

2ej. 20

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA



DISEÑO DE UN HORNO ROTATORIO

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a n :

ROBERTO DEL SAGRADO CORAZON DE JESUS BRAVO ILLOLDI

JUAN MANUEL CHAVEZ CHAVEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

	Pág.
I. PROLOGO.	I.
II. INTRODUCCION.	IV.
III. CAPITULO I. OBTENCION. - PROPIEDADES DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.	1.
IV. CAPITULO II. HORNO PARA LA FUSION DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.	38.
V. CAPITULO III. CALCULO DEL AIRE TEORICO Y PRACTICO PARA LOS COMBUSTIBLES DIESEL Y GAS L. P.	70.
VI. CAPITULO IV. DISEÑO Y CALCULOS TERMICOS DEL HORNO ROTATORIO.	79.
VII. CAPITULO V. LADRILLOS REFRACTARIOS.	106.
VIII. CAPITULO VI. TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION.	141.
IX. BIBLIOGRAFIA.	

PROLOGO

Desde un principio, el hombre, debido a sus diversas necesidades para su supervivencia, le preocuparon los materiales; tales materiales, no eran ni con mucho refinados. Lo principal para el hombre de aquellas épocas, en tales materiales, era la propiedad de dureza que podía observar en los mismos. Estos materiales no eran otra cosa que huesos de animales muertos, piedras de diversos tipos y madera, entre muchos otros.

Al paso del tiempo, y al ir creciendo las necesidades del hombre, tales como la vivienda, agricultura, caza, etc.; los materiales empleados para tales fines fueron cada vez más selectos, de tal manera que el hombre fue fijando su atención en otras propiedades de los materiales, o bien, necesitó que las propiedades que ya antes había observado, fueran mayores, de este modo, y con los descubrimientos, si se quiere accidentales que hizo, con el tiempo llegó al hierro, y con éste, el hombre realizó una auténtica revolución tecnológica.

Con el hierro el hombre encontró un formidable medio para ayudarlo a satisfacer sus necesidades más apremiantes, y también algo que lo ayudó a superar su nivel tecnológico. Con todo esto, y aunado a los trabajos metalúrgicos realizados sobre el hierro, éste alcanzó una calidad y una importancia sin igual en la historia de los materiales.

Durante el transcurso del tiempo se hicieron otros descubrimientos en el campo de la metalurgia, a los cuales no se les dió la importancia que merecían en su momento.

Los trabajos sobre el hierro dieron como resultado el acero y posteriormente los aceros aleados y aceros especiales que acrecentaron la importancia del hierro.

Sin embargo, no todas las necesidades humanas en cuanto a materiales se refiere, eran de dureza; asimismo, el hecho de que hubiera piezas de complicada forma cuya manufactura en hierro era muy difícil y costosa, ésto claro, siempre y cuando su necesidad de dureza no fuera mucha. Además, en muchos otros campos de la actividad humana, en particular y por ser representativo el de la aviación, sus componentes deberían tener un peso mínimo. Esto encausó las investigaciones a la búsqueda de un metal ligero, de cierta resistencia a la fatiga y a la corrosión, entre otras muchas propiedades. Dichas investigaciones llegaron hasta un metal que hoy día es básico en ingeniería y que es el aluminio.

Esta alta utilidad del aluminio hoy en día y debido a la gran cantidad del mismo, que es solicitada por la industria, nos ha motivado para la realización de la presente Tesis, ya que en ésta trataremos de encontrar un método, o más bien dicho, el diseño de un horno económico y de fácil operación para eficientizar las operaciones de colado de piezas y partes de aluminio.

Es nuestro deseo que el presente trabajo sirva para que en lo futuro, las operaciones arriba mencionadas, sean llevadas eficiente y económicamente a cabo.

INTRODUCCION

Desde los tiempos más remotos, los metales han jugado un papel preponderante en el desenvolvimiento de la civilización humana, hasta el grado en que es posible establecer una clara y precisa relación del desarrollo de las diferentes civilizaciones y su habilidad para la obtención y adaptación de los diferentes metales para su beneficio.

Fue en el año de 1808 en Inglaterra, que Sir Humprey Davy, establece la existencia del aluminio, aunque sin poder aislarlo de sus compuesto, y le da un nombre: Alumium, que posteriormente se convertirá en Aluminium.

En el año de 1825, H. C. Oersted obtiene en Copenhague un pequeño glóbulo de aluminio metálico todavía muy impuro. Hacia el año de 1829, Woehler, continuando los trabajos de Oersted prepara el cloruro de aluminio por vía química, el cual, tratado con potasio, libera el aluminio bajo la forma de un polvo que es imposible de compactar por calentamiento.

Más adelante en 1854, Saint Claire Deville, continuando asimismo los trabajos de Woehler, substituye el cloruro de aluminio por el cloruro doble de aluminio y sodio, y el potasio por el sodio como reductor; utiliza además, un crisol inerte con respecto al metal fundido, de esta forma realiza por primera vez, la fusión bajo fundente, que juega un papel muy importante en las técnicas actuales.

Inspirado por la reducción del cloruro de magnesio mediante la corriente eléctrica descubierta por Bauseu, Saint Claire Deville se decide por la reducción mediante la corriente eléctrica del cloruro doble de aluminio y sodio.

Las fuentes de energía insuficientes, le impiden desarrollar este procedimiento y le obligan a volver a la reducción química mediante el sodio. Para industrializar este método, pone a punto una fabricación económica de este metal, cuyo precio se reduce de 2000 a 1000 francos (oro) por kilogramo.

Desde 1854, las propiedades fundamentales del aluminio, que permiten preveer la importancia industrial de este nuevo metal, fueron perfectamente descritas por Saint Claire Deville: ligereza, conductividad eléctrica, tenacidad, inalterabilidad e inocuidad. Asimismo, las fuentes de materia prima fueron bien definidas: la bauxita, óxido complejo de aluminio, hierro y de titanio, en el que predomina la alúmina descubierta hacia el año de 1820 por Berthier, que había presentado su interés. La criolita, fluoruro doble de aluminio y sodio descubierto en Groenlandia, que después jugará un papel muy importante, sobre todo en los procesos electrolíticos, gracias a su bajo punto de fusión y su aptitud para disolver alúmina.

Pero sólo hasta 1886 logró inventarse un procedimiento industrial económico de reducción. En ese año, dos científicos trabajando independientemente, Charles Martin Hall, un ingeniero norteamericano, y Paul Héroult de Francia, desarrollaron el mismo procedimiento electrolítico para reducir la alúmina a aluminio, debido a los avances realizados en el campo de la electricidad. Este procedimiento es el que se utiliza en la actualidad, y en realidad casi no ha sufrido alteraciones, sólo pequeños cambios debidos al aumento en su explotación.

Hacia el año de 1900, el desarrollo industrial del aluminio comienza a aumentar, ya que la producción en ese año fue de 7300 toneladas entre sólo 4 países.

Tetmajer investiga y desarrolla nuevas aleaciones del aluminio empleables en la construcción. Al principio, los principales usuarios del aluminio fueron los fabricantes de utensilios de cocina, a quienes les atraía el fácil manejo del metal, su conductividad térmica, su resistencia al ataque químico y su ligereza.

La buena resistencia a la corrosión fue motivo para que se le utilizara ampliamente en la construcción de techos de casas, asimismo, por su alta reflexión que hacía posible que las temperaturas en los interiores fueran bastante estables.

Fue hasta 1910 en que el estudio de las aleaciones fue abordado de manera lógica gracias al descubrimiento del endurecimiento estructural de Wilm. Este, al estudiar las aleaciones de aluminio-magnesio al 2% de magnesio laminadas, preparadas con un aluminio que contenía cantidades importantes de silicio, y al medir las propiedades mecánicas justamente después de un recocido y después de dos días de reposo, encontró importantes diferencias. A partir de 1920, se trabaja ya en forma intensiva y sistemática para la obtención de nuevas aleaciones de aluminio que hacen posible que éste sea aplicable cada vez más y en más variados campos de la industria.

CAPITULO I

OBTENCION.

PROPIEDADES DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.

OBTENCION

OPERACIONES Y PROCESOS UNITARIOS.

Con este nombre se conocen los pasos consecutivos necesarios para la producción de metal a partir de su mineral; estos pasos varían dependiendo del metal que se trate, pero se ha observado que estos procedimientos consisten en diferentes permutaciones y combinaciones de un número relativamente pequeño de pasos unitarios.

Una definición más científica es que los procesos unitarios implican primordialmente reacciones químicas o cambios de estado de agregación, mientras que las operaciones unitarios no implican primordialmente reacciones a granel ni cambios de estado. Se podrían utilizar otras bases para estas definiciones, sin embargo, tomaremos para nuestro estudio éstas y para ayudarnos un poco más, las detallaremos más ampliamente en la siguiente tabla.

OPERACIONES UNITARIAS

Trituración .

Cribado .

Clasificación .

Separación de sólidos de los fluidos.

Separación de los fluidos pesados.

Cribado hidráulico.

Concentración de película fluyente.

Flotación y aglomeración.

Separación magnética.

Agitación y mezclado.

Manejo de materiales.

PROCESOS UNITARIOS

Procesos gas-sólido (incluyendo tostación, calcinación, reducción gaseosa y secado).

Sinterización y piroaglomeración.

Reducción de óxidos metálicos.

Destilación en retortas.

Fusión simple.

Refinado de metales líquidos.

Fusión en alto horno.

Conversión.

Fusión y licuación.

Fundición y solidificación.

Destilación y sublimación.

Procesos hidrometalúrgicos.

Procesos electrolíticos.

Para completar estos puntos tenemos a los procesos integrados y a los diagramas de procesos típicos; los primeros se definen como una secuencia coordinada de operaciones unitarias y procesos unitarios que en ciertos aspectos es autocompleta; los segundos son unos diagramas condensados porque nos muestran únicamente los pasos principales y esenciales y los cambios de flujo material.

El proceso más usado en la actualidad para la producción de alúmina de grado metálico es el de Bayer, nombrado así por el químico alemán Karl Bayer.

Consiste en extraer la bauxita de las minas por el método de depósito abierto, luego se tritura, algunas ocasiones se lava para remover archilla y se seca. A continuación, se embarca a una planta de refinado donde se hace óxido de aluminio o alúmina, como se le llama en la industria.

La bauxita, finamente pulverizada, se carga en un digestor en el cual es tratada con una solución de sosa cáustica a presión y a una temperatura muy superior a la de su punto de ebullición.

A una alta temperatura en el digestor, los hidróxidos de sodio reaccionan con la bauxita para formar aluminato de sodio que permanece en solución en el licor. Los óxidos de hierro, silicio, titanio y otras impurezas, son insolubles y se asientan con las impurezas no disueltas de la bauxita. A estos residuos insolubles, a los que les da coloración el óxido de hierro se le llama lodo rojo.

Después de completarse la digestión, se reduce la presión; el lodo rojo se fuerza a salir del digestor pasándolo a través de prensas filtro y se desecha. El licor que contiene la alúmina como extracto, en forma de aluminato de sodio, se bombea a depósitos llamados precipitadores.

En los precipitadores se añade al licor cristales finos de hidróxidos de aluminio, provenientes de un ciclo anterior. Estos cristales se hacen circular por entre el licor y sirven como cristales simientes, que van creciendo en dimensiones, a medida que el hidróxido de aluminio se separa de la solución.

El hidróxido de aluminio que se retira del licor es luego calentado en hornos, arriba de 980°C para expulsar el agua de combinación. Esto hace que la alúmina cambie a una forma cristalina que se asemeja a la arena blanca a la que se le parece también el azúcar. En esta forma, la alúmina queda adecuada para el proceso de fusión.

El proceso de fusión es el paso final en la producción del lingote de aluminio no aleado. Un grupo de ollas de acero, forradas por dentro con carbón, se conectan eléctricamente para formar una línea de ollas. Las ollas se proveen con bloques de carbono que sirven como ánodos, mientras que el forro de carbono sirve como cátodo. Se añade a las ollas alúmina y criolita sintética. La corriente eléctrica pasa desde el ánodo hasta el cátodo, generando calor con temperatura de 980°C aproximadamente,

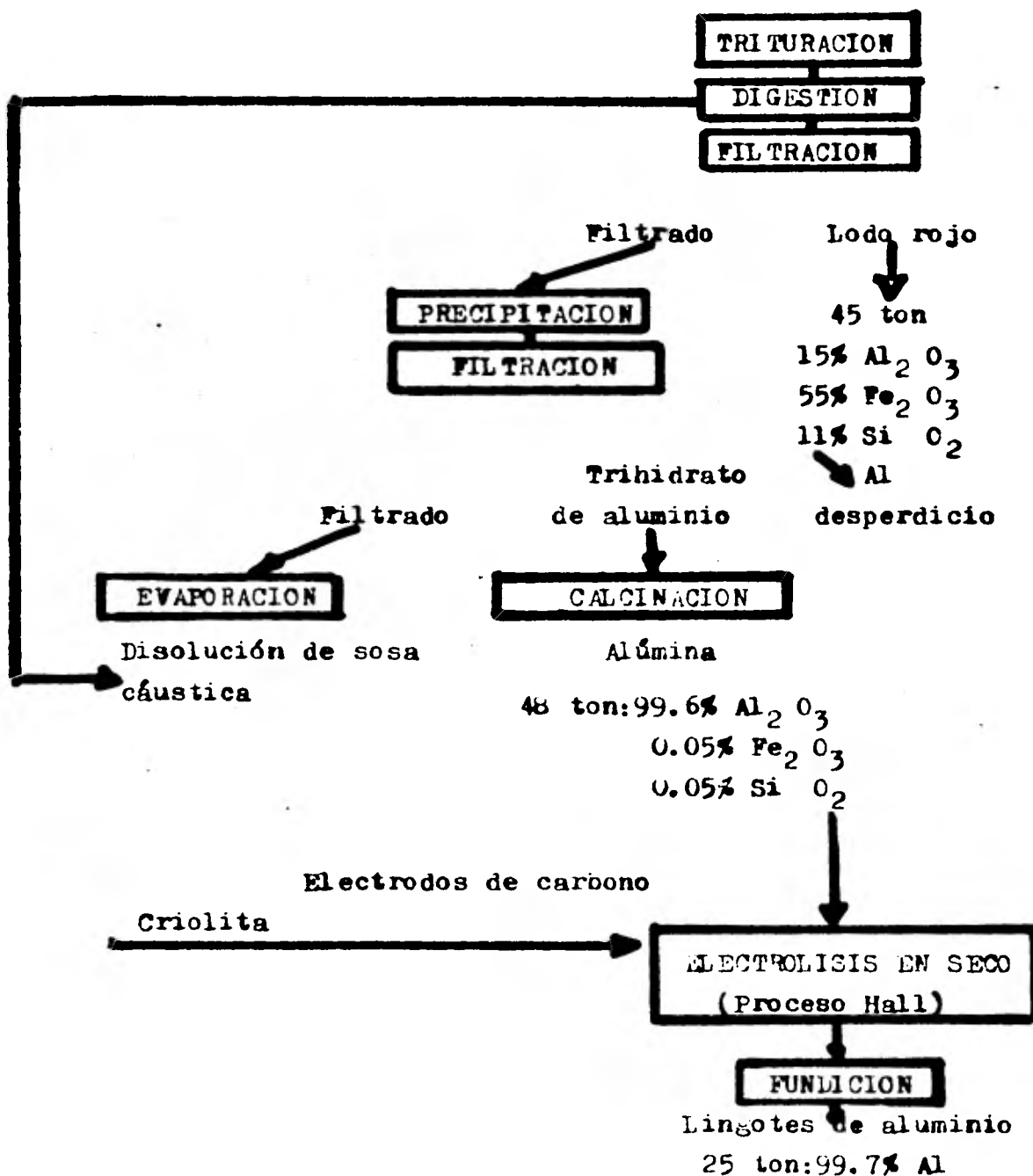
que funde la criolita y forma un baño. La alúmina se disuelve en el baño y se saca por el fondo de la olla, como aluminio fundido.

A intervalos periódicos, el aluminio primario en estado fundido, se extrae de las celdas electrolíticas para ser llevado al crisol.

Luego, el metal es transportado por medio de un montacargas al departamento central de colado para alearlo o moldearlo en lingotes que sirven para la fabricación de láminas, placas y laminillas, en un tren laminador adjunto.

DIAGRAMA CONDENSADO
MINERAL DE BAUXITA

100 ton: 55% $Al_2 O_3$, 25% $Fe_2 O_3$, 5% $Si O_2$



PROPIEDADES FISICAS

DENSIDAD. - La densidad del aluminio puro es de 2.7 g/cc, así que es una tercera parte de la del acero. Las cantidades relativamente reducidas de otros metales que se agregan para formar las aleaciones no cambian su densidad en forma apreciable. El peso liviano de las aleaciones de aluminio, junto con su resistencia, es una de las principales razones de su uso extenso.

La baja densidad del aluminio fundido trae como resultado una baja presión hidrostática, y por consiguiente la construcción de los hornos no es necesariamente tan robusta como lo es en hornos diseñados para la fusión de otros metales como hierro, bronce, etc.

RESISTIVIDAD Y CONDUCTIVIDAD ELECTRICA. - El aluminio puro tiene resistividad de 0.00000263 ohms/cm³.

A pesar de que el aluminio tiene una menor conductividad en comparación con la del cobre, un alambre de aluminio con la misma resistencia que uno de cobre, sólo pesa la mitad. Esta cualidad del aluminio lo hace ideal para el tendido de líneas de transmisión de corriente eléctrica largas.

Aunque todas las impurezas y elementos de aleación tienden a reducir la conductividad eléctrica del aluminio, varían mucho en severidad. Si el aluminio contiene cantidades muy reducidas de vanadio o titanio en forma de impurezas su conductividad resulta seriamente afectada en tanto que el magnesio la afectará muy poco. El tratamiento térmico en solución también

también tiende a disminuir la conductividad, pero esta propiedad se restaura con el siguiente endurecimiento por envejecimiento subsiguiente,

CONDUCTIVIDAD TERMICA. - El aluminio puro tiene una conductividad térmica (factor K) de 0.53 calorías por segundo por cm^2 por cm de espesor por grado centígrado. De modo que su conductividad térmica es 4.5 veces mayor que la del acero dulce.

La aleación con otros metales tiende a reducir la conductividad térmica. La alta conductividad térmica del aluminio frecuentemente es un factor importante en su uso en las industrias de alimentos y químicas.

COEFICIENTE DE EXPANSION TERMICA. - El aluminio puro tiene un coeficiente de expansión térmica lineal de 0.0000238mm por grado centígrado, dentro de un alcance de 20 a 100°C. Este coeficiente es aproximadamente dos veces el del acero. Pero, debido al bajo módulo de elasticidad del aluminio, se inducen tensiones menores en la estructura del aluminio con los cambios de temperatura que en la del acero. La aleación con otros metales afecta muy poco el coeficiente de expansión.

MODULO DE ELASTICIDAD. - El módulo de elasticidad Young del aluminio es 7030 Kg/mm^2 . La aleación con otros metales no altera esta cifra notablemente. De modo que el módulo de Young para el aluminio y sus aleaciones es aproximadamente la tercera parte de la del acero, y ésto es muy

importante en lo que concierne a la rigidez. Pero el bajo módulo de elasticidad Young tiene la ventaja que da a las estructuras de aluminio una capacidad muy elevada para amortiguar los golpes, así como para reducir las tensiones producidas por los cambios de temperatura.

PUNTO DE FUSION. - El punto de fusión del aluminio es de 660°C. Las aleaciones del aluminio, por la presencia de otros metales, tiene un punto de fusión más bajo que el aluminio puro y la fusión ocurre dentro de un alcance de temperaturas que en general es mayor según aumentan los elementos de aleación.

PROPIEDADES QUIMICAS

ABSORCION DE HIDROGENO NACIENTE. - El aluminio tiende a absorber ciertos gases, de los cuales el hidrógeno nasiente es el que causa mayores dificultades. Cualquier cantidad de hidrógeno que esté disuelta en el metal líquido es liberada cuando se solidifica causando porosidad en la pieza vaciada. Este hidrógeno en las piezas solidificadas se encuentra en forma molecular, y por lo general, no vuelve a ser absorbido durante las operaciones de refusión debido a que éste escapa a la atmósfera al pasar el metal al estado líquido.

La solubilidad del hidrógeno en el aluminio líquido varía proporcionalmente con la temperatura. El aluminio puro disuelve 0.037cc/g a una

temperatura de 660° C, en el sólido. A 660° C, en el líquido, la solubilidad aumenta a 0.70cc/g. A 871° C, este valor se cuadruplica. Al agregar elementos con objeto de obtener aleaciones, la curva de solubilidad varía un poco. En general, para las aleaciones del aluminio comúnmente empleadas podemos considerar que la solubilidad del hidrógeno aumenta notablemente a partir de 760° C.

Las fuentes de donde proviene el hidrógeno se pueden reducir a las siguientes tres posibilidades:

1). - Humedad existente en los lingotes o en la chatarra que se carga al horno.

2). - Humedad en la atmósfera.

3). - Vapor de agua producido en el proceso de combustión.

Si este vapor está en contacto con el baño de metal se descompone en hidrógeno y oxígeno, el hidrógeno será absorbido y el oxígeno oxidará la superficie metálica produciendo escoria, que se encuentra en la superficie.

1). - HUMEDAD EXISTENTE EN EL METAL.

Pueden existir gases en la superficie del metal en forma de películas debidas a absorción natural, absorción química y a reacciones o productos

de corrosión. Por ésto debe procurarse almacenar el metal en lugares secos evitando la corrosión. En cierta forma, esta posibilidad puede ser disminuida si la carga de metal es precalentada a una temperatura aproximada de 482° C antes de ser introducido en el baño fundido.

2) HUMEDAD EN EL AIRE.

En muchos lugares, la humedad del aire varfa notablemente durante el año. Salvo en casos excepcionales se ha recurrido a métodos para lograr un control en este aspecto, pero todos ellos son imprácticos e incosteables.

3). - PRODUCTOS DE LA COMBUSTION.

El problema de la oxidación y absorción de hidrógeno debido a la formación natural de agua en los productos de combustión, puede ser disminuido teniendo un diseño de horno apropiado, así como una aplicación correcta del equipo de quemadores, de tal manera, que la flama no rompa la capa de óxido que se forma sobre el baño. Esta capa que rodea el aluminio líquido ofrece una resistencia natural a la absorción de hidrógeno y a la oxidación posterior.

Otra fuente de hidrógeno, aunque de menos importancia, es la existencia de una humedad en los utensilios usados. Si éstos se precalientan antes de usarse, eludimos esta posibilidad.

Los hornos con nuevos revestimientos refractarios deben ser calentados hasta una temperatura de 538°C aproximadamente. Es conveniente mantener esta temperatura durante varias horas antes de iniciar las operaciones de fusión, con el objeto de permitir la salida de humedad contenida en los materiales que forman el revestimiento del horno. Se comienza a secar el horno quemando leña seca. Para la evaporación del agua los primeros 500°C se aumentan de 25 en 25 cada hora; y después de los 500 de 50 en 50 hasta llegar a la temperatura de operación.

OXIDACION. - El aluminio en estado líquido tiene gran afinidad por el oxígeno y al combinarse forman óxidos. Las escorias están constituidas principalmente por óxido de aluminio, y pueden encontrarse en suspensión dentro del baño o formando una capa sobre el metal fundido. Las escorias que flotan sobre la superficie del baño metálico contienen una cantidad considerable de aluminio líquido entremezclado y es la oxidación una de las principales causas de pérdida de metal durante la fusión.

La formación de óxido de aluminio aumenta notablemente al aumentar la temperatura.

El óxido de aluminio tiene una gravedad específica que varía entre 3.5 y 3.9. Cuando el metal es agitado, las partículas de óxido permanecen en suspensión durante largo tiempo, debido a la pequeña diferencia que existe entre su gravedad específica y la del aluminio.

La presencia de partículas de óxido en las piezas de aluminio fundido, da origen a zonas de gran dureza, difíciles de maquinar. La fluidez del metal decrece al aumentar el contenido del óxido en suspensión.

La formación de una capa de óxido sobre la superficie del baño fundido, se puede decir que es una ventaja durante la fusión. Esta capa disminuye la absorción de hidrógeno y la oxidación sucesivas. Debe evitarse que esta capa se rompa debido a una agitación excesiva causada por el mal manejo del metal fundido.

La cantidad de escoria formada puede aumentar si se carga al horno con chatarra ya oxidada.

Las aleaciones de aluminio con alto contenido de magnesio presentan una tendencia marcada a la oxidación.

RESISTENCIA A LA CORROSION. - La corrosión puede definirse como la deterioración de un metal por la reacción con el medio ambiente.

Cuando existe corrosión, se nota en varias formas. Puede ser un ataque general en la superficie que produce pérdidas de peso y resistencia. Por otra parte, el ataque puede ser localizado pero muy profundo, produciendo carcomidas que finalmente perforan el metal. Por eso, es importante considerar la corrosión en relación con los requisitos de funcionamiento del equipo, como sigue:

Tipo de corrosión.	Importante en:
Perforación.	Tanques, tubería y techados.
Pérdida de resistencia.	Estructuras.
Deterioro de la superficie.	Aplicaciones arquitectónicas.
	Fachadas de tiendas.
	Paredes de cortina.
	Marcos de ventana.
Contaminación del producto.	Casi todas las aplicaciones en la industria química y de alimentos.

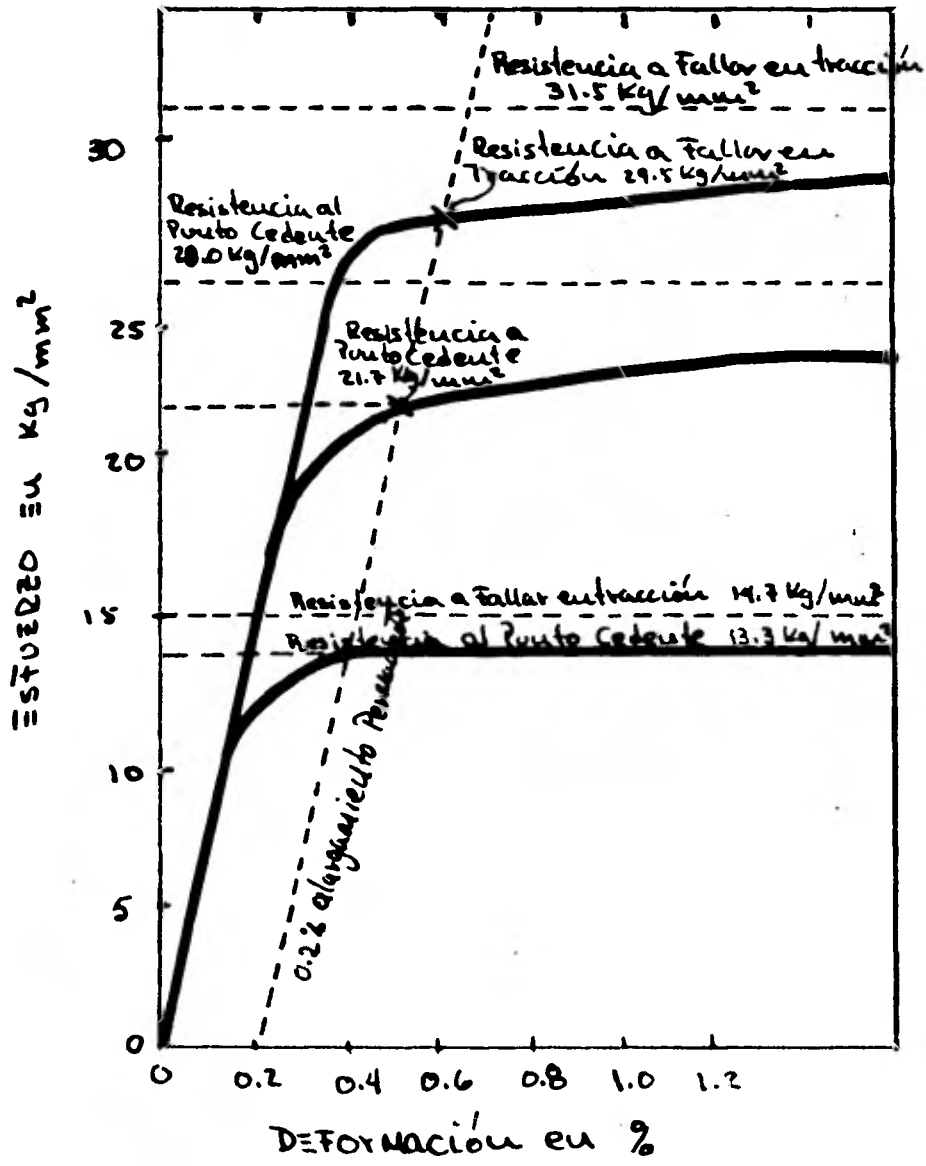
La buena resistencia del aluminio contra la corrosión se debe a una película muy delgada de óxido de aluminio que se forma en la superficie, la cual tiene muy buenas propiedades de reparación propia cuando se daña. La película empieza a formarse en la superficie del metal desnudo al ser expuesto al aire y aumenta rápidamente durante varios días, luego lentamente por un mes y para entonces ya mide 0.000005 mm de espesor. La corrosión de aluminio sólo ocurre cuando dicha película se daña o elimina y ciertas condiciones impiden que vuelva a formarse.

Los productos de la corrosión del aluminio son incoloros y atóxicos, y este detalle, junto con sus buenas características de corrosión, ha hecho que se use extensamente en la industria química y de alimentos.

PROPIEDADES MECANICAS.

RESISTENCIA FINAL A LA TRACCION. - La resistencia final a la tracción es la máxima tensión que resiste el material antes de que ocurra la ruptura. Se calcula dividiendo la carga máxima en kilogramos aplicada durante el ensayo por la sección transversal en mm^2 de la muestra, como la descrita en las especificaciones serie HA de la Asociación de Normas del Canadá.

La resistencia a la ruptura del aluminio puro recocido es aproximadamente 4.9 Kg/mm^2 . Este valor sube como aumenta la aleación, endurecimiento de trabajo y tratamiento térmico. La figura siguiente ilustra algunas curvas típicas de deformaciones.



RESISTENCIA AL PUNTO CEDENTE. - La resistencia al punto cedente es la tensión a la cual el material comienza a deformarse permanentemente, y que para el aluminio es del 2% del largo original medido en una pieza de ensayo normal. Es importante definir este grado de deformación permanente porque las aleaciones de aluminio no tienen un punto cedente tan pronunciado como la mayoría de los aceros.

La resistencia al punto cedente del aluminio puro recocido es aproximadamente 1.26 Kg/mm², pero la de la aleación más resistente fraguada es de unos 50.4 Kg/mm². El endurecimiento de trabajo y el tratamiento térmico aumentan el punto cedente más rápidamente que la resistencia final.

ALARGAMIENTO. - El alargamiento se expresa en % del largo original medido y se calcula por la diferencia del largo que se mide entre los puntos de calibración, antes y después del ensayo a la ruptura. El alargamiento es la indicación de la ductilidad. Pero el valor de ductilidad es relativamente menor para una muestra delgada que para una gruesa de la misma aleación, por lo que es necesario coordinar el alargamiento con el espesor de la muestra.

DUREZA. - La dureza es la medida de la resistencia del metal a la indentación. Hay varias pruebas para determinar la dureza, siendo las más comunes la Brinell, la Pirámide de Diamante Vickers, y la Rockwell.

Todos los ensayos de dureza son empíricos, y aunque hay tablas que indican la relación entre ellos, las cifras equivalentes tienen que usarse con reserva. No hay relación directa entre el número de dureza y la resistencia a la tracción de las diversas aleaciones de aluminio.

La aleación aumenta grandemente la resistencia del aluminio, así como el tratamiento térmico y el endurecimiento por trabajo, pero la dureza es significativamente más baja que la de la mayoría de los aceros. Pueden aplicarse superficies duras al aluminio ya sea mediante el plateado al cromo duro, o la anodización.

RESISTENCIA AL CORTE. - La resistencia al corte es el esfuerzo requerido para producir la fractura de la muestra por una fuerza aplicada en el plano de la sección de la misma. Generalmente se mide en una muestra cilíndrica colocada en un montaje de doble corte como el descrito en las especificaciones serie HA, de la Asociación de Normas del Canadá.

RESISTENCIA A LA FATIGA. - La fatiga es la tendencia de los metales a romperse al ser sometidos a esfuerzos cíclicos repetidos, que son considerablemente más bajos que la resistencia a la tracción. Conforme disminuye el esfuerzo cíclico aplicado, aumenta el número de ciclos requerido para producir la fractura. Algunos metales alcanzan un límite de fatiga que al parecer puede aplicarse un número infinito de veces sin que se produzca la ruptura. Las aleaciones de aluminio no muestran un verdadero límite de

fatiga, aunque el número de ciclos antes de la falla aumenta considerablemente con la reducción del esfuerzo.

La forma de la muestra que se ensaya produce efectos importantes en los resultados. Las concentraciones de tensiones que se producen por cambios abruptos de sección o de aspereza superficial, reducen la resistencia a la fatiga. La resistencia a la fatiga del metal determina el diseño del artículo que tiene que ser sometido a un número muy elevado de inversiones de esfuerzos.

EFFECTOS POR ALTAS Y BAJAS TEMPERATURAS. - La resistencia del aluminio disminuye conforme aumenta su temperatura. A temperaturas bajas hasta de 100°C, los efectos son perceptibles, y cuando son de más de 260°C, las propiedades tienen que haberse reducido hasta un 80%.

A la inversa, las temperaturas muy bajas tienden a mejorar la resistencia del aluminio sin hacerlo quebradizo como suele suceder con muchos aceros corrientes.

ALEACIONES DE ALUMINIO.

INTRODUCCION. - En la fundición, el aluminio es rara vez usado en forma pura, generalmente se utilizan aleaciones de este metal. Las aleaciones del aluminio se hacen con varios metales y combinaciones. El gran alcance de las aleaciones ofrece a la industria una variedad

sumamente amplia de combinaciones de resistencia mecánica, ductilidad, conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, etc.

Naturalmente, en una aleación no pueden combinarse las propiedades óptimas para cada aplicación, siendo necesario conocer las ventajas y limitaciones de cada aleación para poder hacer la mejor selección.

En el trabajo de fundición, elementos adicionales son agregados del aluminio por dos razones principales: Para mejorar las características de fundición como son: un aumento en la fluidez del metal fundido, reducción de las contracciones en la pieza al solidificar, etc. Para proveer a la pieza producida de ciertas características, como son: resistencia a la corrosión, dureza, maquinabilidad, soldabilidad, etc.

Los elementos comunmente agregados para formar aleaciones de aluminio son los siguientes: silicio, cobre, magnesio, titanio, boro, manganeso, zinc, níquel, cromo, estaño, sodio, berilio y fierro.

PROPIEDADES QUE IMPARTEN LOS DIFERENTES ELEMENTOS A LAS ALEACIONES DE ALUMINIO.

SILICIO. - Se usa en concentraciones hasta del 12% y es el elemento más ampliamente usado. Mejora la fluidez del metal, facilitando el flujo a través de paredes delgadas en la cavidad del molde y permitiendo la reproducción de detalles. Tienen sus aleaciones el menor coeficiente de

contracción. Con el empleo de silicio en las aleaciones se logran piezas herméticas destinadas a la contención de líquidos a presión. Asimismo, reduce el coeficiente de expansión térmica y mejora la soldabilidad.

Cuando se combina con magnesio, se nota un aumento en la resistencia mecánica de las piezas así obtenidas, sin embargo, no contribuye a aumentar la maquinabilidad.

Si el silicio está presente formando cristales primarios o pequeñas placas, dificultará la maquinabilidad; esta tendencia aumenta si la concentración de este elemento es alta y si la solidificación se hace muy lentamente. Debido a lo anterior, será preferible que cuando haya de estar el silicio presente, deberá de formar partículas esféricas ampliamente dispersas. Algunas veces será necesario modificar los granos de silicio agregando pequeñas cantidades de sodio.

Si hay hierro presente, éste puede ser la causa de que se formen estructuras cristalinas quebradizas. Por lo anterior, el hierro debe mantenerse al mínimo, hasta donde sea posible cuando las aleaciones tengan un alto contenido de silicio.

COBRE.- Dentro de las aleaciones, es uno de los principales agentes endurecedores utilizados hoy día.

Estas aleaciones pueden ser tratadas térmicamente debido a la solubilidad casi nula que tiene el cobre en el aluminio y que varía a temperaturas diferentes, ya que a altas temperaturas el cobre es soluble en aluminio e insoluble a temperatura ambiente. Con el tratamiento térmico se mejoran notablemente las propiedades mecánicas de las aleaciones.

Por lo que se refiere a la presencia de este elemento en la fundición, aporta ventajas ya que las rajaduras internas que se producen durante el proceso de solidificación, son evitadas y la maquinabilidad de las piezas coladas, se ve mejorada. Ahora que, por otro lado, la presencia de cobre en las aleaciones de aluminio ocasiona una disminución considerable en lo que a resistencia a la corrosión se refiere, por las reacciones galvánicas que existen entre las partículas ricas en cobre y las partículas de aluminio puro en presencia de humedad. Las concentraciones necesarias de cobre para producir óptimos resultados, son de un 3% a un 11%, cuando han sido sometidas a tratamiento térmico.

MAGNESIO. - La solubilidad de este elemento en aluminio es muy parecida a la del cobre, por lo que es el elemento que sigue en importancia. Cuando el contenido de magnesio es superior al 8% , las aleaciones responden mejor al tratamiento térmico.

Las aleaciones con contenido de magnesio, presentan dificultades importantes en el colado, en virtud de que este metal tiene una gran tendencia a la oxidación. Los elementos como el cobre, fierro y el silicio, producen una serie de efectos desfavorables en las aleaciones aluminio-magnesio.

Cuando se presentan efectos desfavorables correspondientes a la oxidación, se agregan pequeñas cantidades de berilio para reducirlos. Con el magnesio se mejoran las siguientes características de las aleaciones: resistencia a la corrosión, maquinabilidad y la ductilidad.

En caso de que el contenido de magnesio en concentración sea menor al 8%, el tratamiento térmico sólo será posible si hay presencia de otros elementos, como pueden ser el cobre o el silicio.

TITANIO. - Este elemento es un refinador de grano, y es agregado en todas las aleaciones para su fundición, especialmente en aquellas piezas que van a ser coladas en moldes permanentes. El refinamiento del grano da como resultado un mejoramiento extraordinario de las propiedades mecánicas de la aleación.

Las características notables que resultan de la presencia de titanio en las aleaciones, son las siguientes: superior ductilidad, mejoramiento de la resistencia a la tensión y reducción de la conductividad térmica.

Los resultados obtenidos pueden mejorarse con la combinación de titanio y boro. La mayor cantidad de titanio en las aleaciones, que puede permitirse, es de 0.2%.

BORO. - Las virtudes y efectos que se logran con la presencia de este elemento en las aleaciones de aluminio, son muy parecidos a los que se obtienen con la presencia de titanio. O sea, que también se usa como un refinador del grano. Por lo que se refiere a la concentración, ésta no debe exceder al 0.01%.

FIERRO. - Este es un elemento que también se usa como refinador de grano, y ocasionalmente, se le utiliza para reducir la contracción. Sin embargo, resulta muy perjudicial cuando las aleaciones tienen un gran contenido de silicio, debido a que ésto trae como resultado la formación de granos de gran tamaño, cuya estructura es quebradiza.

La presencia del fierro en las aleaciones, tiene como finalidad, en las piezas que se van a obtener de moldes de matriz, evitar que éstas se queden adheridas al molde.

Encontramos que la concentración de este elemento varfa entre 0.15% y 1%.

MANGANESO. - Este es otro elemento que también actúa como refinador del grano, así como, también reduce la contracción. Se obtiene también de este elemento, un mejoramiento de las propiedades mecánicas de la aleación a altas temperaturas. Es necesario que las aleaciones que contengan manganeso estén libres de contaminación con fierro, ya que si ésto se produce, traerá como consecuencia que haya un efecto perjudicial en las propiedades mecánicas.

CROMO. - Actúa como refinador de grano.

NIQUEL. - Este es un valioso elemento que aporta un mejoramiento de las propiedades mecánicas de la aleación a temperaturas elevadas, y mejora en forma notable la estabilidad dimensional. El níquel se utiliza por lo general en combinación con otros elementos.

ZINC. - Una buena resistencia al impacto se logra con las adiciones de zinc, si se hace en combinación con magnesio. Con ésto también se obtiene una gran resistencia a la tensión, asimismo, una gran ductibilidad. La maquinabilidad se mejora con pequeñas cantidades de zinc.

ESTAÑO. - El estaño es un elemento que procura a las aleaciones de aluminio con alto contenido de cobre, una mejor maquinabilidad. En las piezas fundidas, las adiciones de este elemento provocan una alta resistencia al rozamiento.

BERILIO. - Tiene la gran cualidad, en las aleaciones con alto contenido de magnesio, de reducir la formación de escorias. En las operaciones de fusión evita las pérdidas de magnesio. De este elemento, las concentraciones requeridas son por lo general inferiores a 0.1%.

PLOMO. - Este elemento en pequeñas adiciones procuran un mejoramiento a la maquinabilidad de las aleaciones que contienen estaño. En vista de su limitada solubilidad, el plomo es un elemento difícil de agregar.

NOMENCLATURA.

La gran variedad de aleaciones produce un problema de considerable magnitud sobre la nomenclatura, ya que en la actualidad no existe ningún vocabulario reconocido, y a un nivel nacional ha sido muy difícil llegar hasta un grado de normalización para las aleaciones de uso más frecuente.

Se hará mención de dos nomenclaturas de las más usuales con el objeto de tener una ayuda o consulta para así poder reconocer alguna aleación que se nos presente.

Al hacer la nomenclatura de las aleaciones, las agrupamos según el aleante principal, en ocho grupos a los que se les ha asignado un número de acuerdo con el cuadro siguiente:

Componente principal	Número del grupo de la aleación
Aluminio sin alear 99%	1
Aleaciones de aluminio	
Cobre (Cu)	2
Manganeso (Mn)	3
Silicio (Si)	4
Magnesio (Mg)	5
Mg ₂ Si	6
Zinc (Zn)	7
Otros	8

Dicha desintegración se hará con un número de cuatro cifras. La primera nos establecerá el grupo al que pertenece la aleación, tomándose del cuadro anterior. Las dos últimas cifras nos servirán para numerar las aleaciones, haciéndose notar que no corresponde al orden cronológico de su establecimiento. La segunda cifra, la que correspondería a las centenas, nos designa modificaciones, que se han efectuado a las aleaciones ya establecidas. Cuando es cero, normalmente corresponde a la aleación original y tampoco se observa el orden cronológico.

Entre las aleaciones de aluminio encontramos dos grupos convenientemente distribuidos: las aleaciones tratables térmicamente para darles mayor

resistencia, y las aleaciones no tratables térmicamente pero cuya resistencia puede aumentarse trabajándolas en frío.

El sistema de símbolos de temple recomendado es el siguiente:

La letra H seguida de dos cifras. La primera cifra denota la práctica seguida en su producción, a saber:

- H1 - el material sólo ha sido sometido a endurecimiento de trabajo en frío.
- H2 - el material está endurecido por trabajo en frío y parcialmente recocido.
- H3 - el material está endurecido por trabajo en frío y estabilizado.

Y la segunda cifra denota el grado de endurecimiento del trabajo:

- 1 - un octavo de dureza
- 2 - un cuarto de dureza
- 4 - medio duro
- 6 - tres cuartos duro
- 8 - duro
- 9 - extraduro

Otro sistema es el que ha adoptado un gran número de productores de aleaciones de aluminio en América; consiste en grupos de números para indicar los principales ingredientes de la aleación.

Las aleaciones fraguadas se identifican con uno o dos números, de la letra "S" seguidos, las aleaciones para fundición tienen números de tres cifras. Se usan números de cuatro cifras para ciertas aleaciones que se preparan por orden especial del cliente, así como para una serie de aleaciones "endurecedoras" que usan las fundiciones y fabricantes al preparar sus propias combinaciones de aleaciones.

El sistema de numeración es el siguiente:

Aleaciones fraguadas:

1S	99.5% mínima pureza del aluminio
2S	99.0% mínima pureza del aluminio
3S a 9S	el ingrediente principal de aleación es magnesio
10S a 29S	el ingrediente principal de aleación es cobre
30S a 39S	el ingrediente principal de aleación es silicio
50S a 69S	el ingrediente es magnesio o silicuro de magnesio
70S a 79S	el elemento principal de aleación es zinc

Aleaciones para fundición:

100	99.5% mínima pureza del aluminio
101	99.0% a 99.5% pureza del aluminio
110 a 199	el ingrediente principal es silicio
200 a 299	el ingrediente principal es cobre
300 a 399	el ingrediente principal es magnesio
400 a 499	el ingrediente principal es zinc
500 a 599	el ingrediente principal es manganeso
600 a 699	el ingrediente principal es níquel
700 a 799	el ingrediente principal es estaño

Cuando se ha modificado la composición original de una aleación normal, se agrega al número una letra como prefijo, por ejemplo, A143 o B54S.

CLASIFICACION DE LAS ALEACIONES PARA FUNDICION.

Las aleaciones de aluminio para fundición de uso común, contienen uno o más de los elementos discutidos anteriormente. Estos elementos se agregan con el objeto de facilitar las operaciones de fundición o para proveer a la pieza terminada, determinadas características.

Las aleaciones de aluminio se dividen de la siguiente manera:

1). - Aleaciones binarias:

- a. Aluminio-cobre (12, 195, B195, 112, 212, 113, A113)
- b. Aluminio-silicio (43, 13, A13)
- c. Aluminio-magnesio (214, 218, 220)

2). - Aleaciones compuestas:

- a. Aluminio-cobre-silicio (85, 108, 319, 333, 380 y 384)
- b. Aluminio-silicio-magnesio (355, 356, 357, 360 y 382)
- c. Aluminio-silicio-níquel-cobre-magnesio (A132, B132)
- d. Aluminio-cobre-níquel-magnesio (142 y A142)
- e. Aluminio-zinc-magnesio (A612 y B612)

ALGUNAS ALEACIONES

Aleaciones aluminio-cobre y aluminio-cobre-silicio. - Durante muchos años, como únicas aleaciones para la fundición, fueron usadas aleaciones en las cuales el cobre era el único elemento agregado intencionalmente, pero que contenían cantidades variables de otros elementos como impurezas. Al transcurrir el tiempo, un cierto número de aleaciones fueron creadas, todas ellas contenían aproximadamente 8% o un poco menos de cobre, pero además contenían pequeñas cantidades controladas de otros elementos como silicio, zinc y fierro, con el objeto de mejorar la maquinabilidad de las piezas. Las aleaciones 112, 113, C113 y 212 son de este tipo y han substituido prácticamente a la aleación original número 12, pero éstas a su vez han sido reemplazadas por las aleaciones aluminio-cobre-silicio. Las aleaciones 113, C113 y 212 tienen un contenido mayor de silicio que la aleación 112, y por ello tienen una mayor fluidez. Las aleaciones 113 y C113 fueron creadas para la fundición en moldes permanentes, mientras que las aleaciones 212 y 112 tienen su uso principal en fundición en arena.

Las aleaciones 195 y B195 para fundición en arena, y fundición en molde permanente respectivamente, tienen un contenido de cobre del 4% y sus propiedades mejoran notablemente si se somete a un tratamiento térmico. Con ello se logra una excelente combinación de ductilidad y dureza. Sin embargo, sus propiedades no son tan buenas como las de las aleaciones aluminio-silicio-magnesio, como la 355 y 356, las cuales tienen propiedades mecánicas semejantes.

Las piezas de aluminio fundido que deban retener su dureza a altas temperaturas y tener una buena resistencia al desgaste, pueden fabricarse empleando la aleación 122, aunque las aleaciones 142, A132 y 0132 la han reemplazado en muchas aplicaciones.

De creación más reciente es la serie de aleaciones aluminio-cobre-silicio con contenido menor al 5% de cobre y contenido de silicio del 3%. Las aleaciones para fundición en matriz (fundidos a presión) números 85, 380 y A380 son representativas de este grupo, como también lo es la aleación 108 para fundición en molde de arena y la aleación A108 para fundición en molde permanente. La aleación 319 para fundición en molde de arena y la aleación 333 para fundición en molde permanente, pertenecen a este grupo.

Debido a su alto contenido de silicio estas aleaciones tienen mejores propiedades para el vaciado que las aleaciones aluminio-cobre. Su contenido de cobre imparte propiedades mecánicas superiores a las de las aleaciones aluminio-silicio. Su resistencia a la corrosión es mejor que la de las aleaciones aluminio-cobre.

Aleaciones aluminio-silicio.- Debido a las excelentes características de vaciado de estas aleaciones, han tenido gran aceptación en la producción de piezas vaciadas en moldes de arena, moldes permanentes, moldes de matriz. El contenido de silicio puede ser hasta del 12%, la composición eutéctica

tiene un contenido de silicio cercano a este valor, por lo que tienen gran fluidez, aún a temperaturas próximas a la temperatura de solidificación. Se incluyen en esta clasificación la aleación para fundición en moldes de arena, moldes permanentes y moldes en matriz número 43 y las aleaciones 13 y Al3 para fundición en moldes de matriz.

Es posible mediante el empleo de estas aleaciones, producir sin dificultad alguna, piezas complicadas en las que aparecen tanto secciones delgadas como secciones gruesas en las paredes. Piezas destinadas a la contención de líquidos a presión, deben ser producidas empleando estas aleaciones.

Las aleaciones aluminio-silicio son resistentes a la corrosión y por ello se emplean en piezas destinadas a trabajo marino. Resisten perfectamente las soluciones ácidas propias de los líquidos manejados en la industria textil. Estas aleaciones presentan ciertas dificultades en lo que respecta a su maquinado, pero si se siguen técnicas apropiadas, este problema podrá ser superado.

Aleaciones aluminio-silicio-magnesio. - Las aleaciones pertenecientes a este grupo imparten a las piezas de aluminio fundido excelentes propiedades. Estas aleaciones responden al tratamiento térmico y tienen una resistencia a la tensión comparable a las que se logran en las aleaciones con 4% de

cobre (195 y B195) que han sido tratadas térmicamente, tienen sin embargo, una resistencia al impacto un poco menor. Estas aleaciones pueden ser usadas en la producción de todo tipo de piezas de aluminio fundido de buena calidad.

Las aleaciones 355 y 356 son típicas de este grupo y han reemplazado casi por completo a las aleaciones 195 y B195. Las aleaciones 360 y A 360 también pertenecen a este grupo. Tienen éstas mayor contenido de silicio y por consiguiente una alta fluidez. Se utilizan para la producción de piezas en moldes de matriz.

Aleaciones aluminio-magnesio. - Las aleaciones aluminio-magnesio poseen una excelente combinación de propiedades mecánicas y químicas; son particularmente resistentes a la corrosión. En este aspecto, las aleaciones 214, B214 y 218 son considerablemente superiores a cualquier otra aleación de aluminio para fundición. Sin embargo, las características de vaciado no son tan buenas como las de otras aleaciones y requieren una atención especial en las prácticas de fundición. Además, estas aleaciones no pueden soldarse con la misma facilidad con la que se soldan la mayoría de las otras aleaciones.

La aleación 220, con una concentración de magnesio del 10%, una vez que ha sido sometida a tratamiento térmico, posee las propiedades mecánicas más altas de todas las aleaciones de aluminio para fundición de uso común.

Estas aleaciones tienen un bajo peso específico y una buena maquinabilidad; no deben emplearse en piezas que tengan condiciones de trabajo en las cuales existan altas temperaturas, esto traería como consecuencia una grave disminución en las propiedades mecánicas de dichas piezas.

Aleaciones aluminio-silicio-níquel-magnesio.- Las aleaciones A132 y D132 encuentran gran aplicación en piezas en las que se deben retener las propiedades mecánicas a temperaturas elevadas.

Debido a esto, estas aleaciones se utilizan en la fabricación de pistones para motores de combustión interna.

Aleación aluminio-zinc.- En Europa, las aleaciones aluminio-zinc han ocupado una posición similar a la que ha ocupado la aleación aluminio-cobre para nosotros. Después de un envejecimiento o precipitación natural a temperatura ambiente, que puede durar unos cuantos días, estas aleaciones experimentan un aumento notorio en su resistencia a la tensión con una pérdida considerable en la ductilidad. El envejecimiento de la aleación continúa en ocasiones por más de un año.

Una característica sobresaliente de estas aleaciones, es la gran disminución en las propiedades mecánicas que sufren a temperaturas elevadas.

Las aleaciones A612 y C612 para fundición en molde permanente sin la necesidad de haber sido sometidas a tratamiento térmico alguno, tienen

una resistencia a la tensión comparable a la de las aleaciones aluminio-cobre y aluminio-silicio después de haber sido tratadas térmicamente.

Debido a la notoria disminución en las propiedades mecánicas que sufren estas aleaciones a altas temperaturas, no deben ser utilizadas a más de 90°C.

Aleaciones aluminio-cobre-níquel-magnesio. - La aleación 142 contiene cobre, níquel y magnesio y es frecuentemente utilizada en aquellas piezas que deben tener resistencia a la abrasión, así como también buenas propiedades físicas a altas temperaturas. Tiene algunas de las características de vaciado de las aleaciones aluminio-magnesio y requiere atención en el manejo cuando se encuentra en estado líquido durante las operaciones de fundición para obtener resultados satisfactorios.

Esta aleación es ampliamente usada en la fabricación de tapas de cilindros para motores de avión; también se usa en la producción de pistones para motores de combustión interna. Es susceptible al tratamiento térmico y con éste se logran mejoras en las propiedades más importantes; en este caso como lo son las propiedades mecánicas, y en la estabilización de dimensiones a temperaturas elevadas.

Otras aleaciones de aluminio. - Para satisfacer ciertas propiedades requeridas en diversas aplicaciones particulares, se han creado algunas aleaciones de aluminio especiales.

Donde se requiera una baja conductividad eléctrica, puede ser utilizada la aleación A254 que contiene 6% de magnesio, 1.5% de manganeso y 1.5% de níquel. Esta aleación tiene características de vaciado similares a las aleaciones aluminio-magnesio.

Excelente resistencia al rozamiento se obtiene empleando la aleación 750 que contiene 1% de cobre, 1% de níquel y 6.5% de estaño. Esta aleación fue creada para la fabricación de bielas y bujes para motores de combustión interna. Es probable que esta aleación encuentre nuevos campos de aplicación en la industria.

CAPITULO I I

HORNOS PARA LA FUSION DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

CAPITULO I I.

HORNOS PARA LA FUSION DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

CLASIFICACION.- Diversos tipos de hornos para la fusión de aleaciones de aluminio pueden ser utilizados.

Para una selección adecuada del equipo necesario para la fusión se deben tener en cuenta los siguientes factores: la capacidad, la eficiencia en la fusión y la calidad del metal fundido.

Por otro lado, la selección antes mencionada también va a depender de algunas condiciones. La fuente de energía calorífica empleada usualmente en determinado lugar, será designada la de menor costo y la que acarrea menos problemas en su adquisición. El gas natural, el petróleo y la energía eléctrica son las tres fuentes de energía que podemos utilizar económicamente en hornos diseñados para fundir aluminio y sus aleaciones.

Asimismo, otros factores como lo son el costo inicial del equipo, el costo de la instalación, el costo de operación, mantenimiento y las condiciones de trabajo ocasionadas por el uso de dicho equipo, deberán ser considerados.

Los hornos utilizados en las fundiciones de aleaciones de aluminio pueden ser de varios tipos, algunos de ellos destinados a la fusión y otros para mantener el metal fundido a temperatura constante.

Los hornos que se emplean en la actualidad pueden clasificarse según la fuente de energía calorífica que utilizan.

- A. Hornos que utilizan petróleo como combustible.
- B. Hornos que utilizan gas natural.
- C. Hornos que utilizan energía eléctrica.

Hornos que utilizan petróleo o gas como combustible. - Los hornos que emplean petróleo o gas natural como combustible pueden clasificarse a su vez en dos grupos generales:

- 1) De flama indirecta (en los cuales la flama no está en contacto directo con el metal).
 - a) Hornos de crisol de fierro.
 - b) Horno de crisol de carburo de silicio o de otro material refractario.
 - I. De crisol removible.
 - II. De crisol estacionario.
 - III. De tipo basculante.
- 2) De flama directa (en los cuales la flama está en contacto directo con el metal).

- a) Hornos de reverbero con cámara simple, en los que la carga del horno se efectúa a través de un orificio destinado a este fin.
- b) Hornos de reverbero con cámara simple, en los que la carga del horno se efectúa a través del orificio destinado a la salida de los gases producto de la combustión. Estos hornos pueden ser estacionarios o basculantes.
- c) Hornos con cámara doble.
- d) Hornos rotatorios.

1. Hornos con flama indirecta. - En este tipo de hornos se tiene un crisol; éste puede ser de tipo estacionario, en donde el metal debe ser extraído con cuchara, o de tipo móvil, donde el crisol se emplea para el llenado de moldes. Las capacidades de estos hornos varían entre 11 y 450 Kg.

La superioridad que presenta la fusión en crisol sobre todos los otros tipos de hornos es la dada por las siguientes características:

- a. Calidad del metal.

Los gases de combustión no tienen contacto con el metal fundido, evitando así la absorción de gases. La calidad del metal es también superior.

debido a que se puede tener un control más preciso en la composición del metal fundido, obteniendo así la aleación deseada.

b. Adaptabilidad y flexibilidad.

En este tipo de hornos sin efectuar cambio alguno en el diseño y construcción de éstos se puede quemar una gran cantidad de combustibles. De esta manera se puede hacer que el funcionamiento de estos hornos sea económico. Además, se pueden fundir diferentes aleaciones sin ser necesario el cambio de crisol o de cualquier otro dispositivo.

c. Costo de inversión y costo de operación.

Los costos de operación son mucho menores que los de cualquier otro horno equivalente, dada la simplicidad de construcción de éstos. La inversión inicial también es mínima.

Atmósfera dentro del horno.

Los mejores resultados en la operación de los hornos que emplean gas o petróleo como combustible se obtienen bajo una condición ligeramente oxidante, para esto se requiere un pequeño exceso de aire.

Para lograr una mezcla de aire-combustible adecuada se emplean quemadores proporcionadores.

2. HORNOS DE FLAMA DIRECTA. - Mediante el empleo de este tipo de hornos se obtienen los menores costos por Kg de metal fundido. Los hornos de reverbero son apropiados cuando se requieren grandes cantidades de metal fundido, en especial de una determinada aleación. Debido a que el baño de aluminio se encuentra en contacto directo con los productos de la combustión, estos hornos deben ser operados a bajas temperaturas para lograr un mínimo de absorción de hidrógeno.

Es importante que la flama esté dirigida hacia la superficie del baño en donde ésta puede causar considerable turbulencia, formando escoria y reduciendo la absorción de gases.

Los materiales usados en la construcción del horno son de relativa importancia. Usualmente se utilizan materiales refractarios con alto contenido de alúmina.

Existe un gran número de diferentes diseños de hornos de reverbero, como son los de hogar simple y los de hogar doble, uno para la fusión y otro para mantener el metal a temperatura constante; ambas cámaras pueden estar enteramente separadas o simplemente divididas por una pared de material refractario. El metal frío puede ser cargado al horno por una puerta lateral, o puede ser cargado a través del orificio destinado a la salida de gases producto de la combustión. Se pueden tener uno o más pozos

destinados a la cámara en que se tiene el metal a temperatura constante, de los cuales el metal puede ser extraído mediante el empleo de cucharas de vaciado. Los hornos de reverbero pueden ser estacionarios o basculantes.

a. Hornos de reverbero de cámara doble.

El rápido aumento de la demanda de piezas de aluminio fundido ha dado origen a la creación de nuevos métodos para la fusión y manejo del metal fundido. Este diseño de horno es el resultado de gran cantidad de estudios y trabajos de experimentación. Una de las causas de la porosidad en las piezas de aluminio fundido, es la introducción de metal frío al baño líquido. Pueden existir humedad y gases en la superficie del metal en forma de películas debidas a la absorción natural, absorción química y a reacciones o productos de corrosión. Esta posibilidad de introducir hidrógeno al aluminio fundido, queda completamente eliminada en los hornos de reverbero con cámara doble. Otra causa de la porosidad es el sobrecalentamiento del baño. A alta temperatura el aluminio absorbe hidrógeno más fácilmente.

Teniendo una cámara del horno destinada a contener el metal a temperatura adecuada para el vaciado, se evita en gran parte esta posibilidad, siempre y cuando la temperatura de vaciado no sea superior a 760°C.

La gráfica anterior nos relaciona la temperatura con el contenido de calor en el aluminio puro. Como se puede observar, aproximadamente 90% del calor requerido para llevar el aluminio fundido a una temperatura apropiada para el vaciado se proporciona durante la fusión. Es decir, para llevar el aluminio sólido al estado líquido a una temperatura aproximada de 650°C se requiere 250 Kcal/Kg. Para aumentar la temperatura a 732°C, únicamente se requieren 28 Kcal/Kg adicionales.

Siguiendo el razonamiento anterior, se concluyó que la operación podrá llevarse a cabo en dos etapas. En la primera el metal es llevado al estado líquido y en la segunda, se proporciona a éste la temperatura adecuada para el vaciado. Estas etapas deben efectuarse en cámaras diferentes. Cada una de ellas con quemadores de capacidad apropiada. En la primera de estas cámaras la capacidad del equipo de quemadores es 8 a 9 veces mayor que en la segunda.

Diseño del horno.

Este horno se compone de dos cámaras separadas por una pared de material refractario. Ambas cámaras están comunicadas por un orificio existente en la parte inferior de la cortina. La cámara de fusión es un hogar seco, en el cual el metal que debe fundirse es colocado. El piso de esta cámara tiene una cierta pendiente y con ello se logra que el metal fundido fluya hacia la cámara de contención.

La cámara de contención consiste en una cavidad de poca profundidad (30 cm aproximadamente) revestida con material refractario de alto contenido de alúmina. El nivel alcanzado por la superficie del metal fundido es inferior al nivel en el cual se encuentra la apertura que une a ambas cámaras. Uno o varios pozos destinados a la extracción del metal fundido se comunican a la cámara de contención.

En la cámara de fusión la flama circunda completamente al metal sólido y con ello se logra una deshumidificación total. Se ha comprobado que el metal fluye hacia la cámara de contención una vez que éste ha adquirido una temperatura de 632°C. Esta temperatura es inferior a aquella en que el problema de la absorción de hidrógeno se acentúa.

La capacidad de fusión de este tipo de hornos depende principalmente del área del hogar de la cámara de fusión. En los hornos comunmente utilizados, la capacidad de la cámara de contención corresponde al doble de la capacidad productiva de la cámara de fusión. En otras palabras, un horno con capacidad de 320 kg de cámara de contención, producirá aproximadamente 160 Kg de aluminio por hora. La razón por la cual la capacidad del baño metálico corresponde al doble de la capacidad productiva de la cámara de fusión, es que con ello se obtiene una temperatura constante en el baño fundido.

Un factor de suma importancia en los hornos de reverbero de cualquier tipo es la atmósfera dentro del horno. La flama debe ser siempre reductora.

La flama oxidante al estar en contacto con el metal que debe fundirse, favorecerá a la oxidación causando grandes pérdidas de metal. Cuando se tiene una flama oxidante, la eficiencia del horno es aparentemente alta. Un Kg de aluminio al oxidarse produce aproximadamente 6,668 Kcal. Es evidente que resulta más económico utilizar gas o petróleo y no aluminio como fuente de energía calorífica.

En hornos de este tipo se requieren alrededor de 833 Kcal/Kg de aluminio en la cámara de fusión y 278 Kcal/Kg de metal en la cámara de contención.

La vida del revestimiento refractario en este tipo de hornos varía de uno o dos años según el cuidado que se tenga en la limpieza del horno.

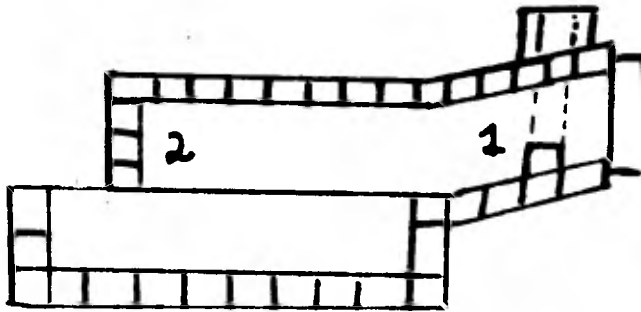
En un horno operado correctamente se tiene una pérdida de metal de 1 a 2% en la cámara de fusión cuando se funde lingote; en la cámara de contención se tiene una pérdida de 1% aproximadamente.

Los hornos de reverbero de cámara doble son los más apropiados cuando se requiere fundir chatarra que contiene insertos de fierro. Una vez que el aluminio se funde, los insertos pueden ser removidos de la cámara de fusión.

El mayor problema con que se ha tropezado en este tipo de hornos, es la poca duración de la pared de material refractario que divide a ambas cámaras.

En diseños posteriores se tienen dos unidades separadas, una para la fusión y otra para la contención de metal fundido.

- b. Horno de reverbero en que la carga se efectúa por el orificio destinado a la salida de gases producto de la combustión.



Este tipo de horno se utiliza principalmente para la fusión de grandes cantidades de metal. Estos hornos pueden ser basculantes o estacionarios.

En los de tipo estacionario se tienen pozos comunicantes con la cámara de fusión del horno, de éstos el metal puede ser extraído mediante el empleo de cucharas de vaciado. Estos hornos se fabrican en capacidades que varían entre 225 Kg y 6,800 Kg, y tienen generalmente una forma de paralelepípedos. El equipo de quemadores se encuentra colocado al frente del horno y la salida de gases o chimenea de carga se encuentra en la parte posterior del mismo.

En una de las caras laterales se tiene una puerta que puede ser utilizada para efectuar las operaciones de desgasificación y desoxidación del metal.

La carga del horno se efectúa a través del orificio destinado a la salida de los gases de combustión. Este es un método conveniente y rápido. Siempre debe cargarse el horno cuando el equipo de quemadores se encuentra en operación. En la parte interior del hogar se tiene un plano inclinado (1) cuyo nivel es superior al nivel de la superficie del baño de metal. En este plano cae el metal que debe ser fundido y de esta manera la carga se precalienta eliminándose así el hidrógeno contenido en el metal frío. El metal al empezar a fundir fluye hacia el baño de aluminio líquido.

Empleando este método se recupera gran parte del calor que normalmente sale al exterior en los gases producto de la combustión. Estos hornos deben ser operados en forma continua para obtener una máxima eficiencia de operación.

Al empezar el trabajo es necesario precalentar el horno durante 45 minutos aproximadamente, antes de poder efectuar la primera carga. Una vez que el baño fundido tiene una profundidad de 30 cm aproximadamente, y se ha logrado una temperatura adecuada para el vaciado, el horno puede ser cargado continuamente de acuerdo con la demanda de metal fundido existente.

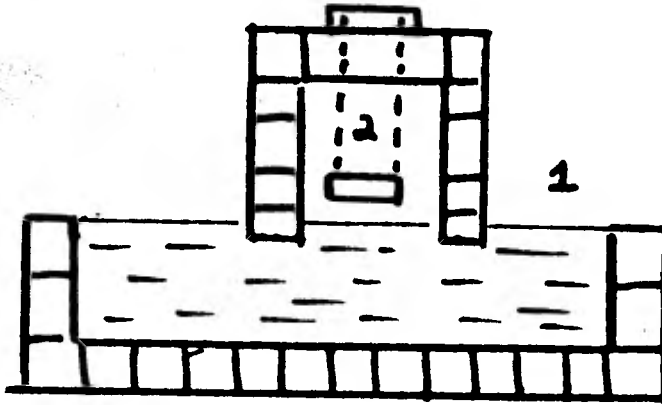
El horno de tipo basculante funciona bajo el mismo principio que el de tipo estacionario. Este tipo ha encontrado gran campo de aplicación en fundidoras en donde se requiere proveer de metal fundido a un gran número de estaciones de vaciado, en las cuales se tienen hornos de crisol destinados a mantener el metal a temperatura constante. Las capacidades de estos hornos varían entre 450 Kg y 1,360 Kg y producen 360 Kg/hr y 900 Kg de metal fundido, respectivamente. El calor requerido en este tipo de hornos es aproximadamente de 1,111 Kcal/Kg de metal fundido. La atmósfera dentro del horno debe ser reductora.

El revestimiento de material dura de 18 a 22 meses, con trabajo continuo. La bóveda del hogar tienen forma de arco y está formada por ladrillos refractarios que se sostienen en su posición, gracias a la acción de resortes colocados en los extremos del arco. Esto permite la libre expansión y contracción de los ladrillos que forman la bóveda.

El tipo de horno de reverbero en que se carga por la chimenea no puede ser igualado desde el punto de vista de la economía de operación y rapidez de fusión; la mano de obra directa e indirecta son mínimas; sin embargo, las pérdidas de metal debidas a la oxidación son de 4% aproximadamente, siendo ésta una de las desventajas principales de este tipo de hornos.

Además, los óxidos contenidos en el metal frío que se carga al horno no pueden ser eliminados sino hasta que pasan a formar parte del baño fundido, por esto es necesario remover escoria continuamente para obtener un metal de buena calidad.

- c. Horno de reverbero en que la carga se efectúa en un pozo de alimentación.



Empleando este tipo de horno de reverbero se obtiene un metal de muy buena calidad. El principio de operación es similar al del tipo antes descrito, con la excepción de que el metal frío se carga en un pozo de alimentación, que usualmente se encuentra en el extremo opuesto al pozo de extracción de metal fundido. Si la capacidad del horno es bastante grande y se cuenta con un equipo de quemadores apropiados, el metal extraído del horno tendrá una calidad y temperatura uniformes. Hornos de reverbero de este tipo se prestan a la producción de grandes volúmenes de una determinada aleación; el cambio de una aleación a otra resultaría costoso. Las condiciones que prevalecen en el interior del horno son ideales, ya que se tienen una temperatura baja, la oxidación y la absorción del hidrógeno son mínimas, porque el metal sólido se alimenta al baño metálico sin tener contacto alguno con los gases producto de la combustión. Las pérdidas de metal debidas a la oxidación son de 1 a 2%.

En este tipo de hornos se utilizan por lo general, fundentes sobre la superficie del baño fundido con el objeto de evitar la absorción de hidrógeno de los productos de combustión.

Las capacidades de estos hornos varían entre 1,350 Kg y 45,000 Kg.

La relación de peso de metal fundido producido con respecto al área ocupada es baja, por ejemplo: un horno con capacidad de 4,500 Kg tiene una relación de 146 Kg/m^2 mientras que un horno tipo Sklenar tiene una relación de 244 Kg/m^2 . En los hornos de reverbero con pozo de alimentación la relación de peso de metal producido con respecto al peso de metal contenido en el baño líquido es de 1 a 6.

El consumo de combustible en estos hornos es un poco mayor que en otros hornos de diseño diferente. El costo de operación directo e indirecto es también mayor, pero debe tenerse presente que la calidad del metal producido es superior.

Los hornos de reverbero con pozo de alimentación han tenido amplia aceptación en las fundiciones que producen lingotes y "billets" para extrusión y laminado, así como también en la recuperación de metal a partir de rebabas y virutas de aluminio.

d. HORNO ROTATORIO.

Los hornos rotatorios para fundir metales se empezaron a utilizar por primera vez en Francia durante la Primera Guerra Mundial. El combustible que utilizaban en aquella época, era a base de carbón pulverizado.

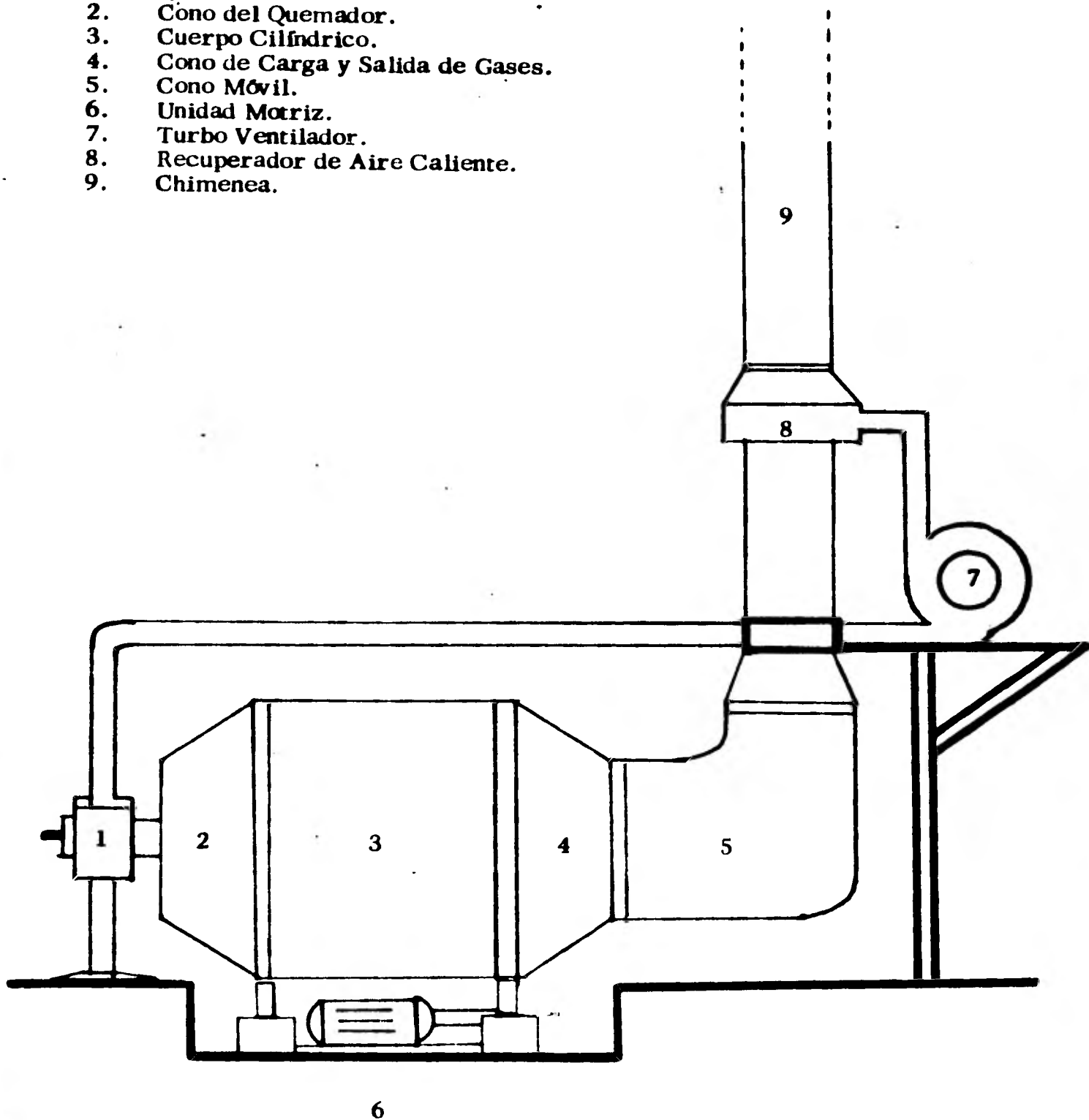
Más adelante los ingleses adoptaron este nuevo proceso para fundir metales y en 1930 se instaló por primera vez, una batería de hornos rotatorios en la fundición, con los cuales se podía fundir continuamente durante dos días, logrando alcanzar temperaturas estables y controlar la composición química y temperatura del metal antes de empezar a colar.

Como desventaja presentaba el tener que emplear como combustible carbón pulverizado, lo cual requería instalar una pequeña planta de pulverizado, lo que representaba una operación extra que necesitaba de mantenimiento especializado y costoso, además de ser difícil y sucia.

Más adelante, este problema se eliminó con el uso de combustibles derivados del petróleo, que proporcionaba limpieza y facilidad de operación, aunando a ello su bajo costo.

HORNO ROTATORIO

1. Quemador.
2. Cóno del Quemador.
3. Cuerpo Cilíndrico.
4. Cono de Carga y Salida de Gases.
5. Cono Móvil.
6. Unidad Motriz.
7. Turbo Ventilador.
8. Recuperador de Aire Caliente.
9. Chimenea.



Descripción.

Está constituido básicamente de lo siguiente:

a. Casco cilíndrico a base de placa de acero controlada, con conos en los extremos, los cuales se sujetan por medio de tornillos y resortes, de tal forma que sea una junta de expansión, con la cual se absorben las dilataciones del material refractario. En el cono del frente, que llamaremos cono del quemador, se encuentran dos canales de sangrado y un orificio para el escoriado.

b. Bastidores. -

El cuerpo del horno descansa sobre cuatro roles sujeto a los bastidores por medio de chumaceras; dichos bastidores van anclados sobre la cimentación construida para este fin; a dos de los roles se les acopla la unidad motriz que proporciona la rotación del horno por medio de una catarina acoplada a la flecha de mando de la cual se fija la unidad motriz por medio de un motor reductor con freno magnético.

c. Recuperador de aire caliente.

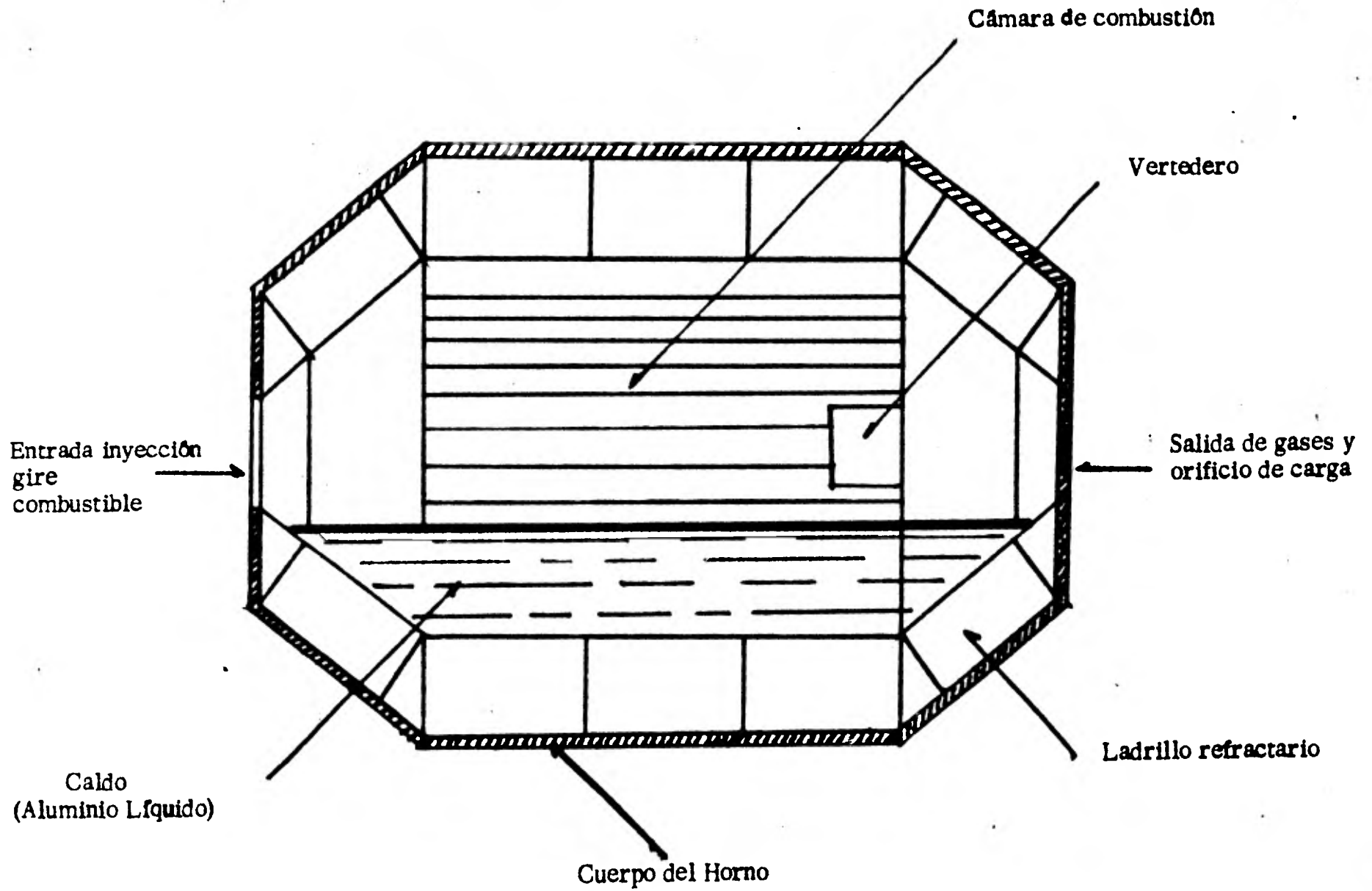
En el cono de carga, o sea la parte trasera del horno, lleva instalado un codo montado sobre ruedas. Este codo es el que comunica la salida de gases del horno al recuperador de calor y se desplaza deslizándose sobre una vfa para la operación de adicionar la chatarra y aleaciones.

Los gases calientes que pasan a través del recuperador de calor, son utilizados para precalentar el aire de combustión que llamaremos aire secundario, el cual es producido por un turboventilador acoplado al recuperador de calor.

d. Cámara de combustión.

Esta cámara está fijada al cono del frente del cuerpo del horno, sobre el cual soporta al quemador y al ducto de aire secundario que viene del

HORNO ROTATORIO



recuperador de calor. Este ducto se comunica a la cámara de combustión tangencialmente, de tal forma, que produzca una corriente en forma de espiral en la flama.

¿Porqué calienta el horno?

Este tipo de hornos calientan por tres razones principales:

- a) Por la radiación de la flama.
- b) Por la conducción de calor dentro del horno a través de los gases calientes.
- c) Por la convección de calor al forro refractario.

Con estas tres características (Fig. 2), se logra una alta eficiencia térmica; desde luego, la energía calorífica producida por la radiación de la flama es la principal característica y depende básicamente del tipo de combustible y del equipo de combustión, por lo que se debe tratar de aprovechar lo más posible la energía calorífica del combustible.

Primera fase.

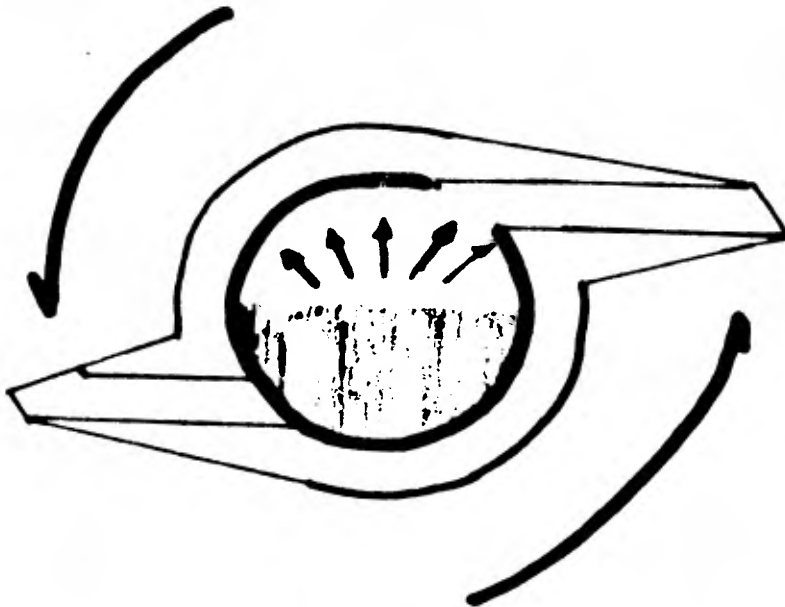
Inicialmente la energía calorífica es transmitida a la carga fría por la radiación de la flama y por la convección del calor de manera intermitente debido a la rotación del horno. El refractario se encuentra a mayor temperatura, por lo que la parte superior transmite la energía calorífica a la carga cuando ésta pasa por debajo.

Segunda fase.

Cuando parte del baño se encuentra en estado pastoso, la rotación del horno es completa, es decir, sus giros son de 360° , con lo cual la energía calorífica es transferida a la carga por la radiación de la flama, así como, por la conducción, tanto el calor del refractario, como por la conducción interna de la parte líquida de la carga.

Tercera fase.

Cuando la carga se encuentra totalmente fundida y se ha formado una capa de escoria sobre la superficie del baño, hay un cambio en la transmisión de calor; en ese período, el porcentaje de energía calorífica transferida a la superficie del baño es mínima. La capa de escoria actúa como aislante impidiendo a los gases de combustión mezclarse con el baño de metal fundido. En estas condiciones, la mayor cantidad de calor se transfiere a causa de la rotación continua del horno, transmitiéndose del refractario al baño metal.



Operación del Horno.

Estos hornos utilizan un quemador de media presión, el cual requiere de aire comprimido a baja presión para la atomización al que se le denomina aire primario; el aire secundario proviene del ventilador centrífugo pasando por el recuperador de calor.

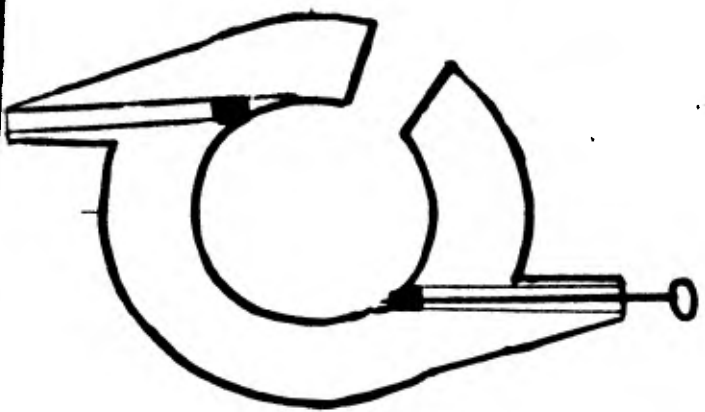
Con la atomización correcta del combustible en combinación con el aire precalentado de baja velocidad y presión, se logra una buena combustión, con lo cual se elimina la necesidad de instalar equipo anticontaminante.

Teniendo la relación aire-combustible balanceada, los productos de combustión no desprenden humos ni partículas a la atmósfera. Esto se logra fácilmente con los rotámetros que miden el flujo de aire y combustible, así como, los manómetros que nos indican las presiones tanto del aire primario como del aire secundario.

Los combustibles normalmente usados en estos hornos, son: diesel, gas natural o petróleo crudo. Ahora bien, como en la práctica no es posible tener una combustión perfecta, conviene mantener siempre la mezcla de aire-combustible ligeramente rica en oxígeno, o en otras palabras, más oxidante.

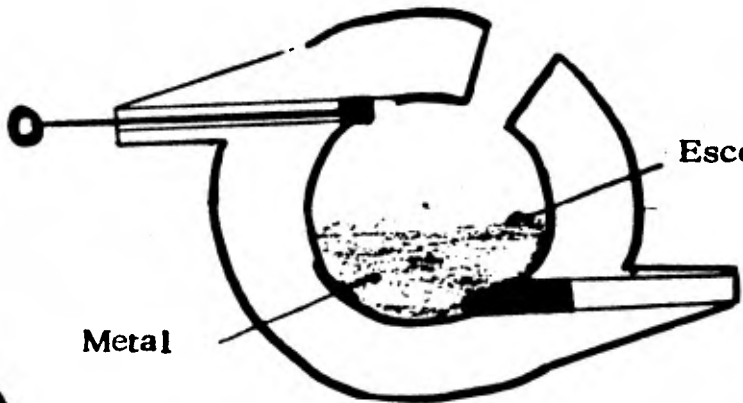
Secuencia para cargar el horno.

1: Taponar

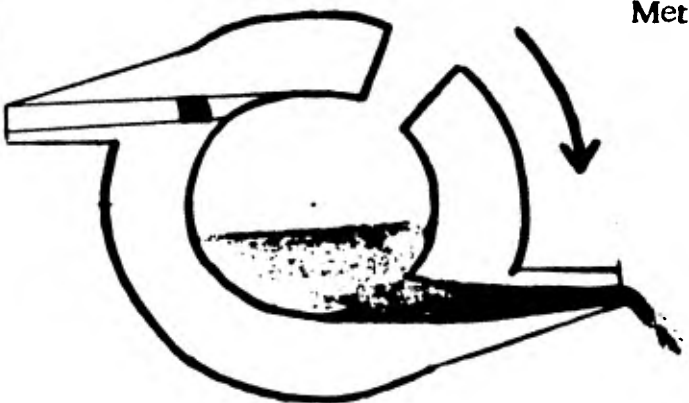


Barreta para Taponar

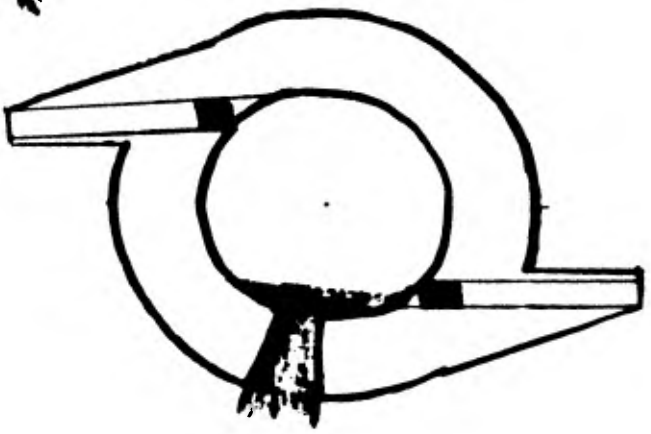
2: Destapar



3: Vaciado



4: Escoriar



El horno se debe precalentar solamente cuando tiene más de veinticuatro horas sin fundir, es decir, normalmente al inicio de la semana; es importante esta observación sobre todo por lo que toca a la vida del refractario. Una vez precalentado el horno, se desplaza el carro del recuperador de calor y se inicia la operación de agregar por la boca de carga la chatarra, rebaba, retornos, etc.

Esta operación se puede hacer manualmente o con los cargadores diseñados para este fin; éstos facilitan y agilizan considerablemente la operación de cargar el horno.

El diseño en cuanto al volumen interior del horno debe ser lo suficientemente grande, para que se pueda cargar la capacidad total de chatarra en una sola operación.

Teniendo la carga dentro del horno se enciende el quemador a toda flama, sin girar el horno hasta completar 15 minutos. En ese momento se gira el horno 180°.

Esta secuencia continúa hasta completar 45 minutos, es decir, girar el horno media vuelta tres veces.

En este momento la carga de metal se encuentra en estado pastoso. Se procede a vaciar una probeta para efectuar los análisis químicos requeridos y a verificar la temperatura del metal. Si todo está correcto, se procede a vaciar o a hacer los ajustes necesarios, agregando al horno las aleaciones requeridas; si la temperatura no es lo suficientemente alta, se continúa girando el horno con toda la intensidad de la flama, de tal forma que se eleve la temperatura del metal al rango deseado.

Teniendo la composición química y la temperatura del metal bajo control, se inicia el vaciado del horno; se puede vaciar toda la carga o dejar parte del metal dentro de éste, según las necesidades y se procede a iniciar nuevamente la operación con el agregado de la chatarra dentro del horno.

HORNOS QUE UTILIZAN ENERGIA ELECTRICA COMO FUENTE DE CALOR.

Existe una gran cantidad de diseños de hornos para fundición que utilizan energía eléctrica como fuente de calor, pero hasta ahora son dos los tipos principales, los que han adquirido cierta importancia en lo que respecta a su aplicación para la fusión de las aleaciones de aluminio.

1. Hornos eléctricos de inducción de baja frecuencia.
2. Hornos de resistencia eléctrica.

El uso de este tipo de hornos ha sido limitado debido a que por lo general la energía eléctrica tiene un costo mayor que el de otras fuentes de energía calorífica. El costo inicial del equipo requerido, es también superior al de cualquier otro tipo de equipo equivalente que utilice gas natural o petróleo como combustible. Sin embargo, hay lugares en donde el costo de la energía eléctrica es bajo y el uso de hornos es justificable.

1. Hornos eléctricos de inducción de baja frecuencia.

En años recientes los hornos de inducción de baja frecuencia han tenido gran aceptación para la fusión del aluminio y sus aleaciones. Este tipo de hornos puede utilizarse tanto para la fusión del metal como para la contención de éste a temperatura constante. El uso de los hornos de inducción presenta ciertas ventajas:

- a) El metal fundido no está en contacto con gases producto de la combustión, teniéndose una absorción de hidrógeno mínima.
- b) La agitación suave debida a la acción de la fuerza electromagnética nos proporciona una composición homogénea del baño fundido.

- c) Se tiene un control bastante preciso de la temperatura del baño; son comunes las tolerancias de 3°C.
- d) Las condiciones de trabajo en la sala de horno son mejores que las ocasionadas por cualquier otro tipo de hornos.
- e) Las pérdidas de metal son de 1 a 2%.

Estos hornos se fabrican con capacidades que varían entre 90 y 2,267 Kg de aluminio y sus potencias varían entre 60 y 500 Kw respectivamente.

Estos hornos operan a una frecuencia de 60 a 50 ciclos y su funcionamiento es básicamente el mismo de un transformador cuyo secundario se encuentra conectado en corto circuito. El embobinado primario que tiene un núcleo formado por láminas delgadas de acero al silicio y está contenido dentro de un ducto de material refractario (véase la figura). Dentro de este ducto circula aire a presión con el objeto de enfriar el embobinado primario. El metal fundido existente en los canales que circundan al ducto constituye el secundario del transformador. El valor de la corriente inducida en estos canales es elevado y por ello se genera bastante calor en el metal líquido. La acción de las fuerzas electromagnéticas provoca una circulación constante de metal.

Para empezar la operación de fusión en un horno nuevo debe procederse de la siguiente manera:

- I. Debe calentarse al rojo el revestimiento de material refractario del horno mediante el empleo de un quemador de gas.
- II. Se introduce metal fundido con el objeto de llenar los canales.
- III. Se da corriente al primario del horno y poco a poco se va cargando el crisol.

Es necesario mantener el metal en estado líquido dentro de los canales durante los períodos de tiempo en que no se trabaja. Cuando se opera un horno de inducción de este tipo a plena capacidad continuamente, es conveniente limpiar los canales una vez por semana. Cuando se funde chatarra sucia o aleaciones con alto contenido de magnesio la limpieza se hace más frecuentemente. La eficiencia térmica es de 70% aproximadamente considerando una base de 24 horas de operación, y es de 50% considerando una base de 8 horas. Se requieren alrededor de 0.4 KWH para fundir y llevar a temperatura de vaciado, 1 Kg de aluminio.

Estos hornos trabajan a un bajo factor de potencia y es por esto que en el circuito se requieren capacitores estáticos para mejorarlo.

El costo inicial de un horno de inducción de baja frecuencia es bastante elevado. Sin embargo, a pesar de ello, en ciertos lugares en donde el costo de la energía eléctrica es bajo, la aplicación de equipo de esta clase, es justificable. Es importante hacer notar lo siguiente: cuando se consume energía eléctrica, se aplica una cierta tarifa fija de acuerdo con la demanda contratada. Así por ejemplo, si tenemos tres hornos de 100 Kw cada uno, y solamente se encuentra en operación uno de ellos, estamos pagando una cantidad proporcional a 300 Kw contratados, aunque éstos no hayan sido consumidos.. Cuando se consume petróleo o gas natural se paga exclusivamente el combustible que ha sido realmente utilizado.

Un punto que ha suscitado grandes controversias, es el referente al beneficio real que sostiene con un baño fundido que se encuentra en constante movimiento. Un argumento es que, gracias a esta agitación suave del metal, se evita la segregación de diversos elementos constitutivos, de la aleación.

Un argumento contrario se basa en lo siguiente: conforme mayor es la superficie del metal fundido expuesta a la atmósfera, mayor será la oxidación.

Es precisamente esto lo que sucede cuando se tiene metal fundido en circulación.

2. HORNOS DE RESISTENCIA ELECTRICA.

Recientemente han aparecido en el mercado hornos con resistencia eléctrica principalmente destinados a la contención del metal a temperatura constante. Los hay de dos tipos:

- a) Con crisol de fierro.
- b) Con revestimiento refractario (tipo reverbero).

Tanto los hornos con resistencia eléctrica como los de inducción ocasionan condiciones de trabajo excelentes en la sala de fundición. La construcción de estos hornos es simple y los espacios requeridos son mínimos. La desventaja que presenta estos hornos con respecto a los hornos de inducción, es la siguiente:

- I. La eficiencia térmica es más baja y por consiguiente:
el consumo de energía eléctrica es mayor.

CAPITULO III

CALCULO DEL AIRE TEORICO Y PRACTICO PARA

LOS COMBUSTIBLES DIESEL Y GAS L. P.

CAPITULO III

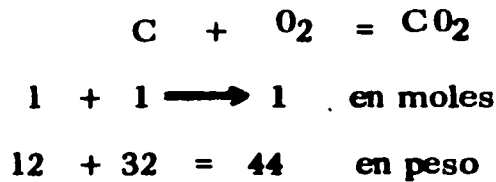
CALCULO DEL AIRE TEORICO Y PRACTICO PARA LOS COMBUSTIBLES DIESEL Y GAS L. P.

Los combustibles comerciales, ya sea en estado natural o en formas preparadas, pueden ser sólidos, líquidos y gaseosos. En el caso específico de nosotros tenemos a los líquidos y gaseosos, aún cuando el gas L. P. se encuentra embotellado en estado líquido a una presión de 14 Kg/cm^2 . Al momento de salir de esta presión, efectúa su cambio de fase de líquido a gaseoso, siendo de esta forma como lo manejamos.

Los elementos fundamentales de un combustible son: carbono (C) e hidrógeno (H). El azufre (S) es un elemento que no se considera como combustible, sino más bien como un cuerpo indeseable.

QUIMICA DE LA COMBUSTION

Combustión es sinónimo de oxidación y consiste en la unión del oxígeno con una materia combustible. Los grados de la combustión varían ampliamente, conociéndose la combustión lenta y la combustión muy rápida o detonación. De acuerdo con los fundamentos de la química, la unión del carbono y oxígeno se expresa de la siguiente forma:



Las expresiones anteriores indican que 1 peso molecular de carbono se combina con 1 peso molecular de oxígeno para producir 1 peso molecular de anhídrido carbónico.

Una mol de una sustancia vale M kilogramos cuando M es el peso molecular. Aún cuando las cantidades que se combinan pueden expresarse en kilogramos, es más sencillo efectuar los cálculos utilizando moles y transformarlos en kilogramos o metros cúbicos solamente cuando sea necesario.

Se dice que una combustión es completa cuando el combustible es totalmente oxidado y se libera toda la energía.

La combustión incompleta puede ser debida a:

- a) Insuficiencia de oxígeno.
- b) Mezcla imperfecta entre el combustible y el oxígeno.
- c) Temperatura demasiado baja para mantener la combustión.

El oxígeno necesario para la combustión es captado siempre del aire, acompañándole gran cantidad de nitrógeno, debido a que no es fácil la separación de ambos. Es por tanto necesario revisar las propiedades del aire como manantial de oxígeno.

En la tabla siguiente mostramos los porcentajes de los principales componentes del aire seco.

	% en volúmenes moles	% en peso	Peso molecular Kg/mol
Oxígeno	20.99	23.19	32
Nitrógeno	78.03	75.47	28.016
Argón	0.94	1.30	39.944
Anhídrido carbónico	0.03	0.04	44.003
Hidrógeno	0.01	0	2.016
Aire seco	100	100	28.967

Para efectos de cálculo, tomaremos que el aire se haya constituido por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, en volumen; y por 23.2% de oxígeno y 76.8% de nitrógeno en peso. Todos los constituyentes pueden considerarse en conjunto como un gas inerte cuyo peso molecular es 28.2 en vez de 28.0, que corresponde al nitrógeno puro.

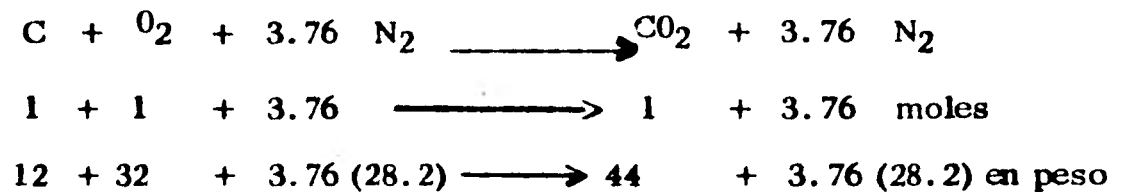
La relación molar entre el nitrógeno y oxígeno del aire es la misma que su relación volumétrica, debido a que ambos son gases y se encuentran a la misma temperatura; por lo tanto, tenemos:

$$\frac{\text{Moles N}_2}{\text{Moles O}_2} = \frac{79\%}{21\%} = 3.76$$

La relación anterior nos indica que por cada mol de oxígeno presente en el aire existen 3.76 moles de nitrógeno.

Por ser el carbono y el hidrógeno los elementos fundamentales, calcularemos el aire requerido para cada uno de estos elementos.

CARBONO



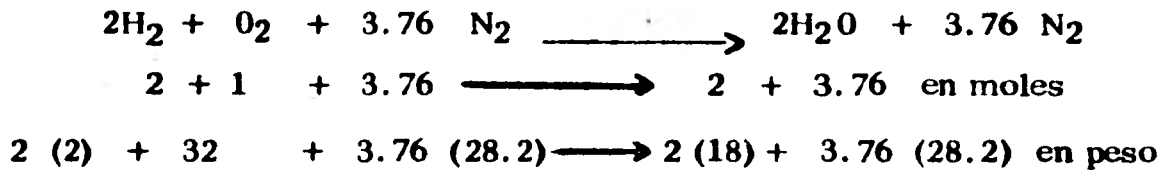
Dividiendo entre 12



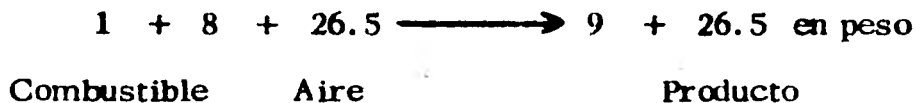
Por lo tanto, el aire requerido será:

$$(2.667 + 8.84)/1 = 11.5 \text{ Kg por Kg de carbono}$$

La combustión del hidrógeno en el aire viene representada por la siguiente ecuación:



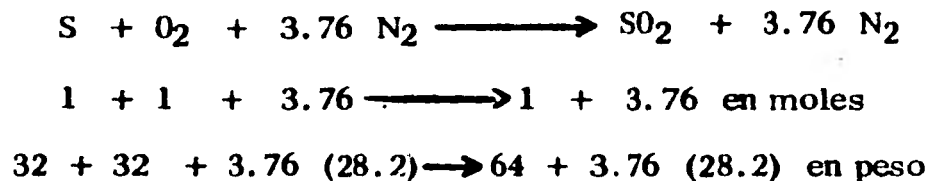
Dividiendo entre 4:



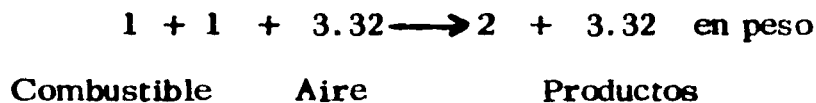
Por lo tanto, el aire requerido será:

$$(8 + 26.5)/1 = 34.5 \text{ Kg de aire por Kg de hidrógeno}$$

La combustión del azufre da:



Dividiendo entre 32 tenemos:



Por lo tanto, el aire requerido por Kg de azufre será:

$$(1 + 3.32)/1 = 4.32 \text{ Kg}$$

Las proporciones químicamente correctas no producen la combustión completa, ya que es muy difícil que cada una de las extraordinariamente numerosas moléculas que componen el combustible encuentren una molécula de oxígeno para combinarse con ella. Para lograr la total oxidación del combustible, es necesario utilizar una mezcla que tenga un cierto exceso de aire.

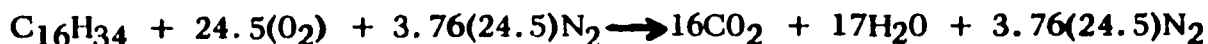
Si el aire es menor al teórico necesario, pueden producirse pérdidas importantes en forma de óxido de carbono, hidrógeno libre e hidrocarburos destilados. En un hogar, el fin que se persigue consiste en emplear el mínimo de exceso de aire compatible en la combustión completa.

La cantidad de aire necesaria en exceso para el funcionamiento del hogar o quemador, depende de la temperatura a la cual se encuentra la mezcla y del grado de mezclado entre el combustible y el aire. Estos factores se resumen en temperatura y turbulencia. Si un combustible puede ser fuertemente dispersado y totalmente mezclado, con el aire, su combustión puede lograrse con un pequeño exceso de aire.

Con esta información previa, podemos calcular el aire teórico necesario para los combustibles usados que son aceite diesel y gas L. P. Fórmula del aceite diesel $C_{16}H_{34}$

Cálculo del aire teórico necesario para el aceite diesel ($C_{16}H_{34}$)

Como vimos anteriormente, para cada carbono necesitamos dos oxígenos y para cada dos hidrógenos un oxígeno, por lo tanto, tenemos:

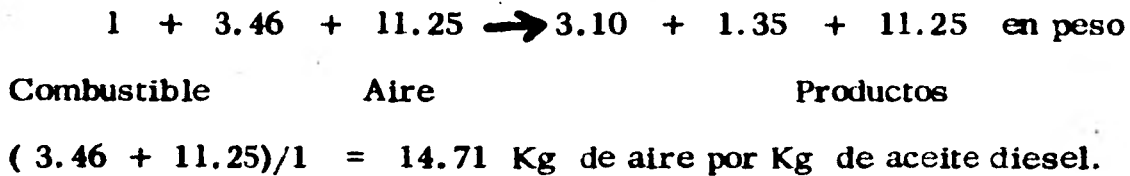


1 + 24.5 + 3.76 (24.5) \longrightarrow 16 + 17 + 3.76(24.5) en moles

Combustible Aire Productos

226 + 782 + 2595 \longrightarrow 705 + 306 + 2595 en peso

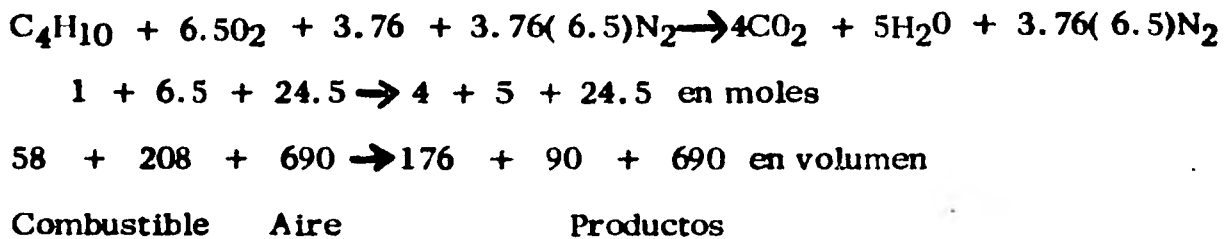
Dividiendo entre 226:



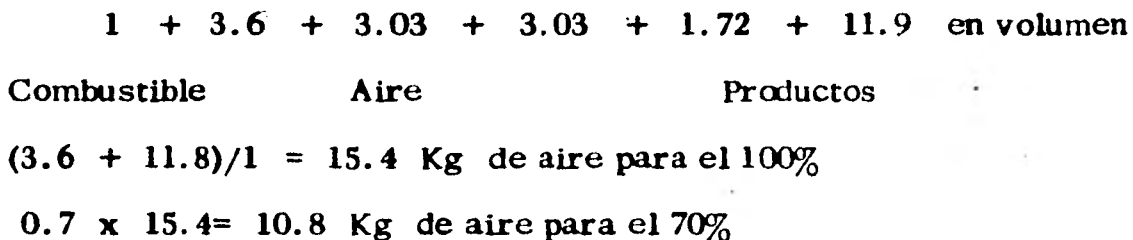
Cálculo del aire teórico necesario para el gas L.P.

Este gas, de acuerdo con la Secretaría de Comercio, consta del 70% de butano y 30% de propano. Efectuando los cálculos primeramente para el 100% de cada elemento y posteriormente tomaremos el porcentaje para el aire teórico necesario.

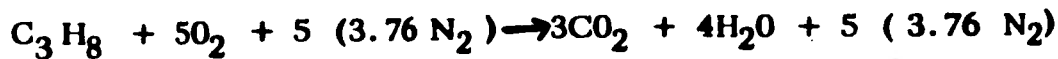
La fórmula del butano es: $C_4 H_{10}$



Dividiendo entre 58:



La fórmula para el propano es: C_3H_8



$$1 + 5 + 18.8 \rightarrow 3 + 4 + 18.8 \text{ en moles}$$

$$44 + 160 + 530 = 132 + 72 + 530 \text{ en peso}$$

Combustible Aire Productos

Dividiendo entre 44 tenemos:

$$1 + 3.64 + 12 \rightarrow 3 + 1.64 + 12.05 \text{ en peso}$$

Combustible Aire Productos

$$(3.64 + 12)/1 \rightarrow 15.64 \text{ Kg de aire para el 100\%}$$

$$0.3 \times 15.64 \rightarrow 4.7 \text{ Kg de aire para el } 100\% \times 30\%$$

Sacando estos dos aires teóricos, obtendremos el aire requerido para el gas L. P.

$$\begin{array}{r} 70\% \text{ butano} \quad 10.8 \\ + \\ 30\% \text{ propano} \quad 4.7 \\ \hline \end{array}$$

$$100\% \text{ gas L.P.} \quad 15.5 \text{ Kg de aire por Kg de gas L.P.}$$

El peso específico del gas L. P. en estado líquido es de 0.5 por lo que necesitamos $A_t = 7.75$ Kg de aire por litro de gas L.P.

Vamos a transformar los kilogramos de aire teórico necesario, a metros cúbicos y posteriormente a pies cúbicos, que es como normalmente se trabaja en los ventiladores.

Un litro de aire para 21.1°C y al nivel del mar, pesa 0.001293 Kg para la altitud de la Ciudad de México, tenemos un factor de corrección de 0.776, por lo que multiplicamos el peso por el factor de corrección y tendremos el peso para la ciudad de México:

$$P = 0.001293 \times 0.776 = 0.0010 \text{ Kg}$$

Ahora tenemos que un litro = 1,000 cm³

$$1 \text{ m}^3 = 1,000,000 \text{ cm}^3$$

por lo tanto,

$$1 \text{ m}^3 = 1,000 \text{ Lts}$$

Si 1 litro pesa 0.0010 Kg,

$$1,000 \text{ litros pesarán } 1,000 \times 0.0010 = 1 \text{ Kg}$$

Por lo tanto,

$$1 \text{ m}^3 = 1 \text{ Kg}$$

Si necesitamos 7.75 Kg de aire por Kg de combustible en volumen será 7.75 m³.

Ahora:

$$1 \text{ m} = 3.28 \text{ ft}$$

$$1 \text{ m}^3 = 35.5 \text{ ft}^3$$

El aire teórico necesario en pies cúbicos es:

$$A_t = 7.75 \times 35.5 = 275 \text{ ft}^3$$

Se requieren 275 ft³ por litro de gas L.P.

CAPITULO IV

DISEÑO Y CALCULOS TERMICOS DEL HORNO ROTATORIO

CAPITULO IV

DISEÑO Y CALCULOS TERMICOS DEL HORNO ROTATORIO

INTRODUCCION

Por lo general, el primer paso que se sigue en el diseño de un horno de cualquier tipo, que utilice petróleo o gas como fuente de energía calorífica, consiste en determinar la capacidad del equipo de combustión requerido. Para lograr este propósito, es necesario calcular los diversos flujos de energía calorífica existentes en el horno en operación y posteriormente establecer un balance de dichas cantidades de energía transmitida.

La energía puede ser transferida por los mecanismos de conducción, convección y radiación. La relativa importancia de los diversos mecanismos depende principalmente del nivel de temperaturas al cual se transmite dicha energía.

Las condiciones que se deberán tener en cuenta para el diseño de este horno son las siguientes: se desea un horno pequeño con capacidad máxima de 100 Kg de aluminio fundido, pues como ya se mencionó en capítulos anteriores, no siempre se utilizará a toda su capacidad, porque su uso estará destinado a la enseñanza práctica o para piezas de uso experimental, no necesitándose por lo tanto un horno de gran tamaño.

Su reducida área de trabajo e instalación facilitará la tarea de hacer un local especial para el horno, tanque de combustible, chimenea, cuchara de alimentación, etc., por lo que casi cualquier área destinada a un taller de trabajos manuales, será suficiente para su instalación, siendo ésta una de sus ventajas.

Se requiere que la operación de fusión se lleve a cabo en el menor tiempo posible para que de esta manera, la gente destinada a elaborar prácticas técnicas o universitarias cuente con el tiempo suficiente para que en una sesión vea o abarque lo deseado.

CALCULOS TERMICOS

Datos:

Cantidad de aluminio a fundir:

100 Kg en la práctica (para efectos de cálculo serán 150 Kg).

Combustible a utilizar:

Diesel.

Materiales a usar en su construcción:

Partes metálicas:

Acero comercial ASTM-36 250 Kg

Rodajas de semiacero con capacidad de 500 Kg

Ladrillo refractario:

Alta calidad, 595 Kg

Mortero:

85% alúmina, 55 Kg

Tiempo aproximado de fundición:

30 minutos.

Dimensiones del horno:

Mostradas en el dibujo final de este capítulo.

Tanto el ladrillo refractario como el mortero podrán ser cambiados por otro tipo de menor calidad, con el objeto de bajar su costo.

DATOS:

$$M = 150 \text{ Kg} = 330.75 \text{ Lbs}$$

$$T = 30 \text{ min}$$

$$C_p = 0.248 \text{ BTU/lb } ^\circ \text{F}$$

$$H_f = 169.0 \text{ BTU/lb}$$

$$T_f = 1215 \text{ } ^\circ \text{F} = 657.2 \text{ } ^\circ \text{C}$$

$$T_a = 68 \text{ } ^\circ \text{F} = 20 \text{ } ^\circ \text{C}$$

M = masa

T = tiempo

C_p = capacidad calorífica a presión constante

H_f = calor latente de fusión

T_f = temperatura de fusión

T_a = temperatura ambiente

T = diferencias de temperaturas

Q₁ = calor necesario para fundir

Q₂ = calor necesario para mantenerlo fundido

CALOR NECESARIO PARA FUNDIR

El calor necesario para fundir el aluminio se obtiene con la siguiente fórmula:

$$Q_1 = M C_p T$$

sólo falta conocer T

$$T = T_f - T_a = 1215^\circ\text{F} - 68^\circ\text{F} = 1147^\circ\text{F}$$

el valor de C_p se obtiene de tablas.

$$Q_1 = \frac{330.75 \text{ lbs}}{30 \text{ min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{0.248 \text{ BTU}}{\text{lb}^\circ\text{F}} \times 1147^\circ\text{F}$$

$$Q_1 = 188,167.64 \text{ BTU/hr}$$

Esto se multiplica por el factor de conversión a Kcal/hr

0.252

$$Q_1 = 188,167.64 \times 0.252 = 47,418.245 \text{ Kcal/hr}$$

CALOR NECESARIO PARA MANTENERLO FUNDIDO

El calor necesario para mantener fundido el aluminio, se obtiene de la siguiente manera:

$$Q_2 = M H_f$$

El valor de H_f también se obtiene de tablas.

$$Q_2 = \frac{330.75 \text{ lb}}{30 \text{ min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \times \frac{169 \text{ BTU}}{1 \text{ lb}}$$

$$Q_2 = 111,793.5 \text{ BTU/hr}$$

Multiplicando por el factor de conversión a Kcal/hr 0.252-

$$Q_2 = 111,793.5 \times 0.252 = 28,171.962 \text{ Kcal/hr}$$

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 = 188,167.64 + 111,793.5 =$$

$$299,961.14 \text{ BTU/hr} \times 0.252 = 75,590.2$$

$$Q_T = 75,590.2 \text{ Kcal/hr}$$

PERDIDAS DE CALOR POR CONVECCION Y RADIACION

Este cálculo es directamente proporcional a la temperatura de proceso y al área de transferencia de calor. Para nuestro caso vamos a dividir el horno en tres secciones:

1. Dos cónicas (entrada y salida)
2. Una cilíndrica (cuerpo del horno, con dos aberturas)

$A_1 =$ Área del cono (truncado) de entrada.

$A_2 =$ Área del cono (truncado) de salida

$A_3 = A_1 + A_2$

$A_4 =$ Área del cuerpo

$A_5 =$ Áreas de las aberturas

$A_6 =$ Área total del horno

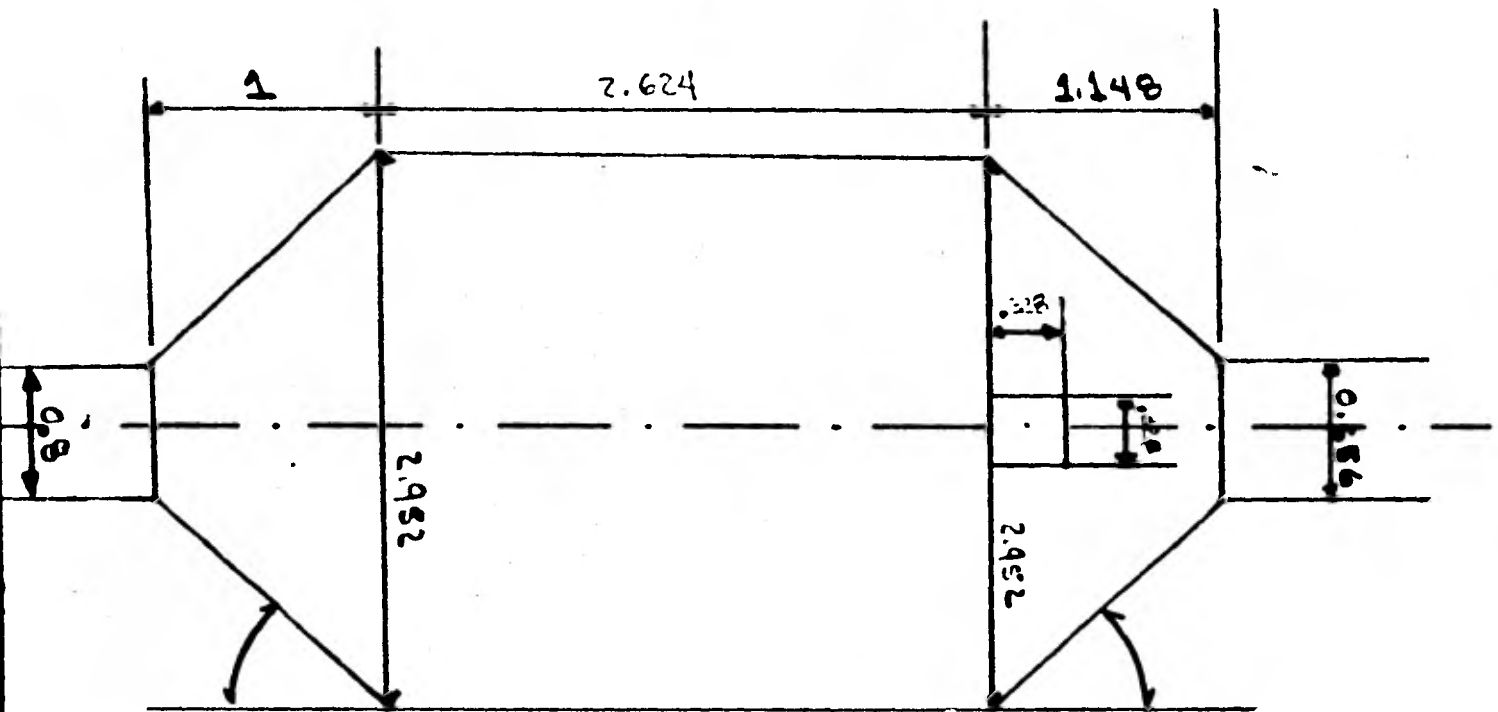
$A_7 =$ Área de la chimenea

Las pérdidas de calor por convección a través de las paredes del horno también van en razón directa del material de construcción del horno y al espesor de éste. Cuanto más grueso sea el espesor del material, menos calor se pierde a la atmósfera.

Las pérdidas por radiación a través de las aberturas, pueden ser tomadas como pérdidas del cuerpo negro.

C A L C U L O S

1. Cálculo de las áreas



$$A_1 = \pi L (r_1 + r_2)$$

$$A_1 = \pi (1) (0.8 + 2.952) = 11.8 \text{ pies}^2$$

$$A_2 = \pi (1.148) (0.656 + 2.952) = 13 \text{ pies}^2$$

$$A_3 = A_1 + A_2 = 11.8 + 13 = 24.8 \text{ pies}^2$$

$$A_4 = \pi D L$$

$$A_4 = (2.952) (2.624) = 24.33 \text{ pies}^2$$

$$A_5 = L \times L \times 2$$

$$A_5 = (.328) (.328) = 0.107 \times 2 = 0.214 \text{ pie}^2$$

$$A_1 = \pi L (\varrho_1 \cdot \varrho_2)$$

$$A_1 = \pi (1) \cdot (0.8 + 2.952) = 11.8 \text{ pies}^2$$

$$A_2 = \pi (1.148) (0.656 + 2.952) = 13 \text{ pies}^2$$

$$A_3 = A_1 + A_2 = 11.8 + 13 = 24.8 \text{ pies}^2$$

$$A_4 = \pi D L$$

$$A_4 = (2.952) (2.624) = 24.33 \text{ pies}^2$$

$$A_5 = L X L X 2$$

$$A_5 = (.328) (.328) = 0.107 \times 2 = 0.214 \text{ pie}^2$$

$$A_1 = \pi L (\varrho_1 + \varrho_2)$$

$$A_1 = \pi (1) \cdot (0.8 + 2.952) = 11.8 \text{ pies}^2$$

$$A_2 = \pi (1.148) \cdot (0.656 + 2.952) = 13 \text{ pies}^2$$

$$A_3 = A_1 + A_2 = 11.8 + 13 = 24.8 \text{ pies}^2$$

$$A_4 = D L$$

$$A_4 = (2.952) \cdot (2.624) = 24.33 \text{ pies}^2$$

$$A_5 = 0.107 \cdot 2 = 0.214 \text{ pies}^2$$

$$A_6 = A_3 + A_4 - A_5$$

$$A_6 = 24.8 + 24.33 - 0.214 = 48.916 \text{ pies}^2$$

$$A_7 = \pi (4,656)^2 = 0.338 \text{ pies}^2$$

El flujo de calor en las paredes de un horno se lleva a cabo por una combinación de radiación y convección creada por la alta temperatura de la flama y de los gases. Una vez que la superficie interior de la pared recibe calor, éste empieza a ser conducido a través de la misma hacia el exterior, quedando la mayor parte de éste en el horno y el resto radiado a la atmósfera.

Las pérdidas por convección debidas a los flujos de los gases a través de las aberturas del horno son como pérdidas de gas por chimenea; estas pérdidas se pueden tomar como eficiencia del horno.

Como ya se mencionó con anterioridad, las pérdidas por radiación a través de las aberturas y de la chimenea del horno pueden ser tomadas como pérdidas por cuerpo negro.

Para nuestros cálculos los datos que ya tenemos son:

$$A_5 = 0.214 \text{ pies}^2$$

$$A_6 = 48.916 \text{ pies}^2$$

$$A_7 = 0.338 \text{ pies}^2$$

Para las pérdidas por convección de las paredes del horno, obtenemos el factor de pérdidas de tablas:

$$f_{p_c} = 4530 \text{ BTU/hr pie}^2$$

Multiplicando este factor por el área del horno $A_6 = 48.916 \text{ pies}^2$, obtenemos la cantidad de calor perdido por convección:

$$Q_4 = 4530 \times 48.916 = 221,589.48 \text{ BTU/hr}$$

y ésto multiplicado por el factor de conversión a Kcal/hr nos dá:

$$Q_4 = 221,589.48 \times 0.252 = 55,840.55 \text{ Kcal/hr}$$

Para las pérdidas por radiación de las áreas abiertas, obtenemos el factor de pérdidas:

$$f_{p_r} = 30,000 \text{ BTU/hr pie}^2$$

Multiplicando este factor por el área de las aberturas.

$$A_5 = 0.214 \text{ pies}^2$$

obtenemos la cantidad de calor perdido por radiación.

$$Q_5 = 30,000 \times 0.214 = 6,420 \text{ BTU/hr}$$

$$Q_5 = 6420 \times 0.252 = 1,617.84 \text{ Kcal/hr}$$

En la tabla se puede leer la eficiencia del horno en base a la temperatura; para 1415° F la eficiencia es de 61%.

Por lo tanto, esto afecta al calor total necesario para la fundición que con el 61% de eficiencia nos da:

$$Q_6 = \frac{Q_3}{61\%} \frac{299,961.14 \text{ BTU/hr}}{0.61} = 492,739.57 \text{ BTU/hr}$$

$$Q_6 = 492,739.57 \times 0.252 = 123,918.37 \text{ Kcal/hr}$$

El calor total necesario para el sistema es:

$$Q_7 = Q_6 + Q_5 + Q_4$$

$$Q_7 = 492,739.57 + 6420 + 221,589.48$$

$$Q_7 = 720,749.05 \text{ BTU/hr}$$

$$Q_7 = 720,749.05 \times 0.252 = 181,628.76 \text{ Kcal/hr}$$

Cantidad de aire necesario para la combustión de acuerdo a la capacidad calorífica del horno.

Según los cálculos en el capítulo III, para el aire teórico necesario para la combustión con diesel, se llegó a la cantidad de 14.71 Kg de aire por Kg de diesel.

$$\text{Gravedad específica del diesel} = 7.30 \text{ lb/gal}$$

$$\text{Poder calorífico del diesel} = 140,000 \text{ BTU/gal}$$

$$\text{Densidad del aire} = 0,0765 \text{ lb/pie}^3$$

$$\frac{Q_7 \text{ (BTU/hr)}}{\text{Poder calorífico}} = \text{gal/hr de diesel}$$

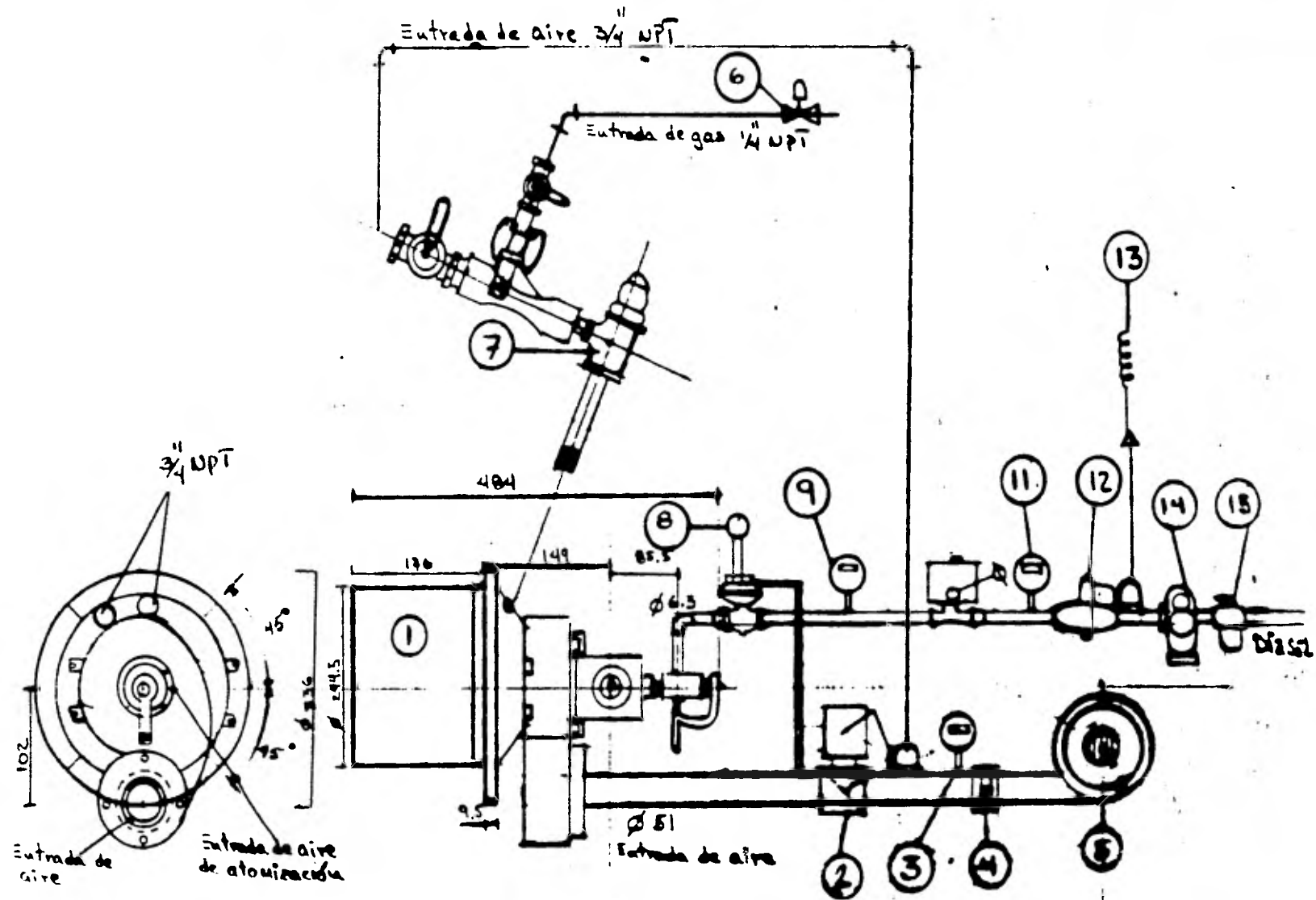
Sustituyendo tenemos:

$$\frac{720,749.05 \text{ BTU/hr}}{140,000 \text{ BTU/gal}} = 5.14 \text{ gal/hr de diesel}$$

$$5.14 \text{ gal/hr} \times 7.30 \text{ lb/gal} = 37.58 \text{ lb/hr de diesel}$$

$$\frac{37.58 \text{ lb/hr}}{2.205 \text{ lb/kg}} = 17.04 \text{ Kg/hr de diesel}$$

Para 720,749.05 BTU/hr es necesario 17.04 Kg/hr de diesel



SISTEMA DE COMBUSTION AIRE DIESEL

AEOP. EN MM.

SISTEMAS DE COMBUSTION

A Automático

M Manual

Componentes:

- M, A 1. Quemador con capacidad de 182,272.36 Kcal/hr (723,303 BTU/hr) a 25 psi de presión de combustible diesel y 96.52 cm CA (38" CA) de presión de aire de combustión y 71.12 cm CA (28" CA) de presión de aire de atomización.
- A 2. Válvula de mariposa para el control de temperatura de 50.8 mm (2") de \varnothing para manejar 7595 pies³/hr de aire con una caída de presión de 38.1 mm (1 1/2") de CA.
- A 2a. Actuador para acoplamiento con la válvula de mariposa, reversible de dos posiciones, usado para operar válvulas de compuerta 120 V, 60 Hz, 30 seg abertura 160°.

- A 3. Límite de baja presión de aire con rango de 1-45" CA ajustable con restablecimiento automático.
- M, A 4. Manguera flexible.
- M, A 5. Ventilador con capacidad de 339.6 m³/hr (1200 pies³/hr) desarrollando una presión 0.1 Kg / / cm² (32 onzas) para un motor de 3F/220-440 volts/50-60 Hz, abierto.
- 6. Válvula solenoide para el piloto, de 9.525 mm de Ø para 120 V, 60 Hz.
- A 7. Piloto para trabajar con gas LP a una presión de 21 cm de CA y con aire a una presión de 71 cm de CA.
- M, A 8. Válvula proporcional de 12.7 mm (1/2" de Ø).
- A 9. Switch de alta presión de combustible diesel con un rango de 10-180 psig ajustable, con restablecimiento manual.
- A 10. Válvula de seguridad de 12.7 mm (1/2") de Ø para 120 V, 60 Hz.
- A 11. Switch de baja presión de combustible diesel con un rango de 10-180 psig ajustable, con restablecimiento manual.

- M, A 12. Regulador de presión para diesel de 1/2" de \varnothing
con un rango de 0-125 psig.
- A 13. Válvula de alivio con capacidad de 150 GPH máximo
y rango de presión de 80-140 psig.
- M, A 14. Bomba de combustible diesel con capacidad de 8 GPH a
1750 RPM.
- M, A 15. Filtro de 3/4" de \varnothing con capacidad de 300 GPH.

NOTA: La bomba de combustible diesel (14) podría ser sustituida
por un tanque alto de 4 m, aproximadamente.

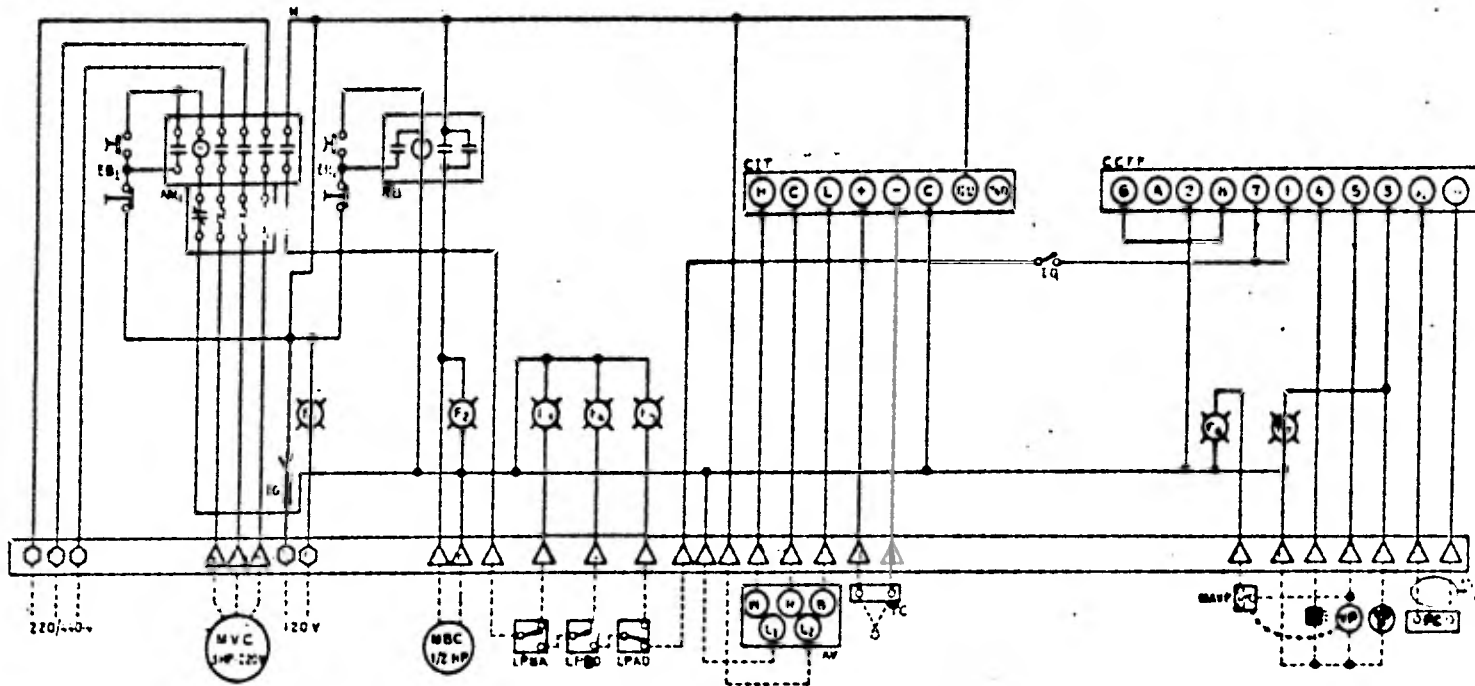
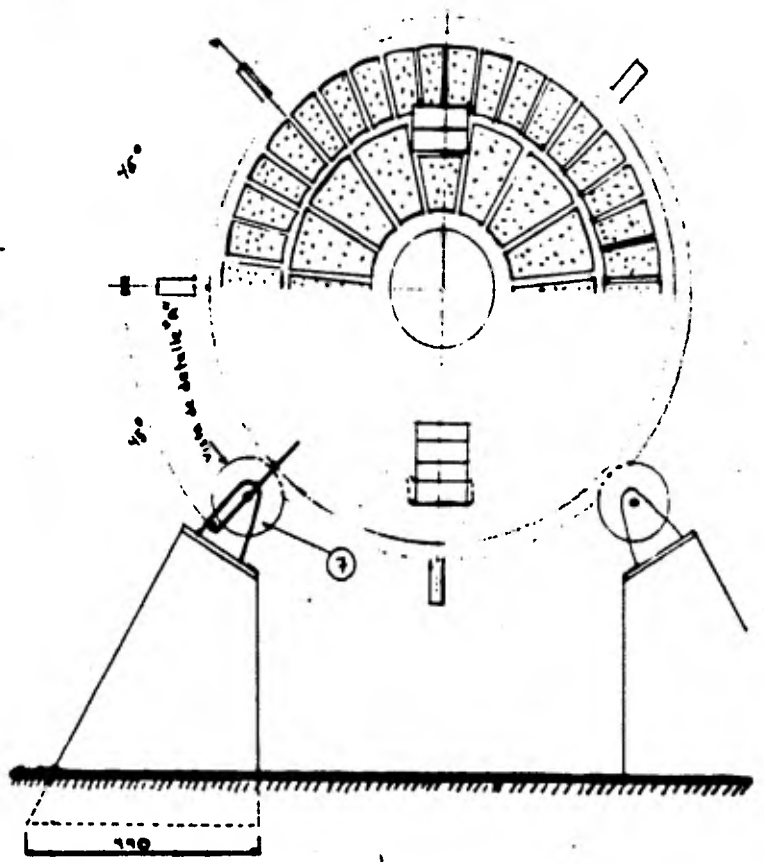
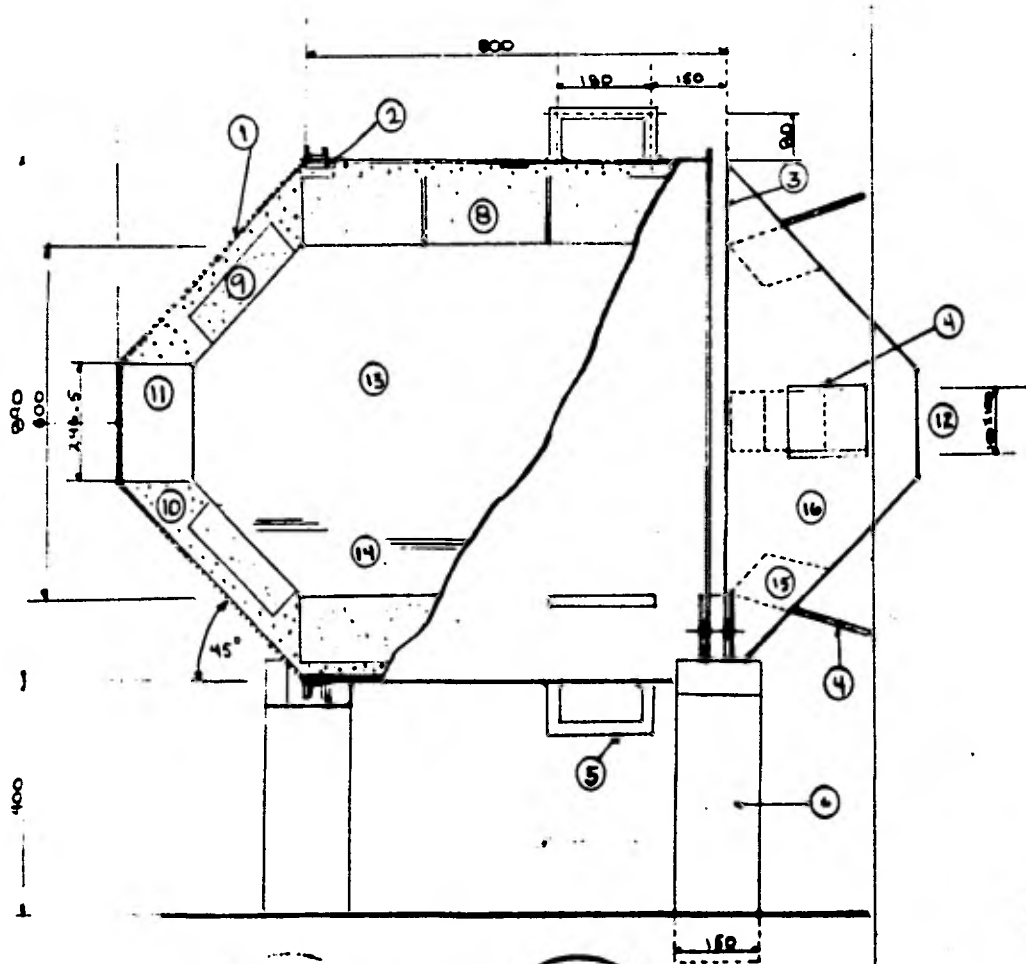


DIAGRAMA ELECTRICO

DIAGRAMA ELECTRICO

CLAVE	DESCRIPCION
EB1, 2	Estación de botones.
AMI	Arrancador magnético.
MVC	Motor de ventilador de combustión.
RB	Relevador para motor de bomba.
MBC	Motor de la bomba de combustible.
IG	Interruptor general.
LPBA	Límite de presión baja del aire.
LPBD	Límite de presión baja del diesel.
LPAD	Límite de presión alta del diesel.
CIT	Control indicador de temperatura p/120 V.
CCFF	Control contra falla de flama p/120 V, 60 Hz.
AV	Actuador de válvula.
TC	Termopar.
IQ	Interruptor del quemador.
TI	Trnsformador de ignición.
VP	Válvula principal.
VSP	Válvula solenoide para el piloto.

MSAVP	Microswitch auxiliar de VP.
FC	Fotocelda.
Fn	Focos piloto para 120 V.
F1	Luz corriente al sistema.
F2	Luz bomba encendida.
F3	Luz presión baja del aire.
F4	Luz presión baja del diesel.
F5	Luz presión alta del diesel.
F6	Luz quemador encendido.
F7	Luz piloto.



DETALLE "A"
Esc. 1:1



DETALLE "B"
Esc. 1:1

COMPONENTES DEL HORNO

NO.	DESIGNACION
1.	Placa cuerpo 1/4" espesor acero comercial ASTM A36.
2.	Soleras refuerzos de 2" x 1 1/4" acero comercial ASTM A36.
3.	Angulos, acero comercial ASTM A36.
4.	Placa 1/4" acero comercial.
5.	Agarraderas barra 3/4" acero comercial.
6.	Bases de concreto.
7.	Rodajas de acero.
8.	Ladrillo refractario alta calidad "Dovela Canto # 2."
9.	Ladrillo refractario alta calidad "Dovela Círculo # 4".
10.	Mortero 85% alúmina.
11.	Entrada del sistema de combustión aire-diesel.
12.	Salida de gases de combustión y orificio de carga del material.
13.	Cámara de combustión.
14.	Aluminio fundido.
15.	Orificios de descarga.
16.	Tapa.

CALCULOS DE PESOS

Elección de los ladrillos refractarios y su peso.

Por sus dimensiones, el Dovela Canto #2 es el ideal para el cuerpo, dejando espacio suficiente para su unión con mortero 85% alúmina.

Dimensiones: 229 X 114 X (64-44) mm.

Aproximadamente se necesitan 37 ladrillos por anillo, teniendo 3.436 ladrillos a lo largo del cuerpo.

Total de ladrillos para el cuerpo = 127.15

Peso por ladrillo de alta calidad = 3.242 Kg

Peso total del cuerpo 412.266 Kg.

Para los conos truncados de entrada y salida, el ideal es el Dovela Círculo # 4.

Dimensiones: 229 X (114-57) X 64 mm

Aproximadamente se necesitan 13.5 por cono

Total de ladrillos: 27

Peso por ladrillo de alta calidad = 2.862 Kg

Peso total de los conos = 77.3 Kg

Peso del mortero 85% alúmina = 55 Kg

Peso de la placa cuerpo = 90.5 Kg

Peso de la placa de los conos = 88.43 Kg

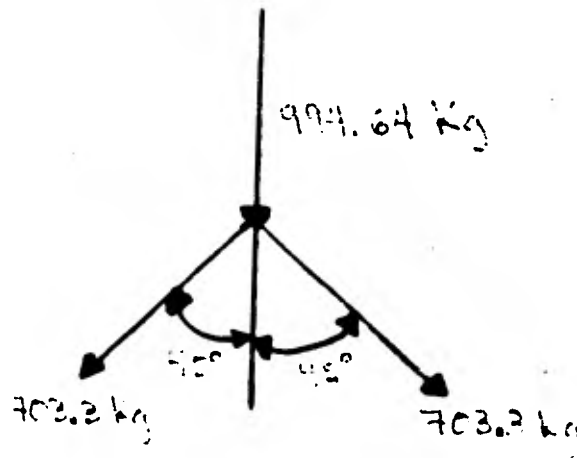
Peso de las soleras y ángulos = 61.6 Kg

Peso de tornillos, etc. = 10 Kg

Peso del aluminio fundido = 200 Kg

Peso total del horno = 994.64 Kg

Como va a tener cuatro puntos de soporte, se hará el siguiente análisis:



Por ser cuatro apoyos:

$$703.3 \div 2 = 351.65 \text{ Kg}$$

La carga por cada rodaja es de 351.65 Kg, por lo tanto, se elige la rodaja con capacidad de 500 Kg de semiacero (dimensiones: 6" \varnothing X 2" X 188 de altura).

TABLA 4-1

ENTRADA DE CALOR REQUERIDO PARA LAS PERDIDAS POR RADIACION

Construcción de Pared		BTU por hora por pie cuadrado de Area						
		4 1/2	4 1/2	4 1/2	4 1/2	9	9	Cuerpo Negro
Ladrillo Refractario.....		4 1/2	4 1/2	4 1/2	4 1/2	9	9	
Ladrillo Refractario Aislante.....		-	-	-	-	-	-	
Aislante.....		-	2 1/2	4 1/2	9	-	2 1/2	
Temperatura en grado F.	1150	3140	1265	822	468	1760	949	1500
	1200	3400	1370	891	507	1900	1030	17400
	1250	3660	1475	959	546	2050	1100	19900
	1300	3930	1585	1030	586	2200	1190	22800
	1350	4220	1700	1100	629	2360	1280	26200
	1400	4530	1825	1190	675	2510	1370	30000
	1450	4860	1960	1270	725	2720	1470	34100
	1500	5210	2100	1370	777	2920	1580	38900
	1550	5580	2250	1460	832	3130	1690	44000
	1600	5980	2416	1570	892	3350	1810	49800
	1650	6400	2580	1680	955	3590	1940	56400
	1700	6810	2760	1790	1020	3810	2070	63400

TABLA 4-2

PROPIEDADES TERMICAS DE LOS METALES

SUBSTANCIA	Cantidad de Calor requerido para pasar de 60° al Punto de Fusión. Btu/Lb por °F.	Punto de Fusión en °F.	Calor en Sólido a Temperatura Fusión. Btu/Lb	Calor Latente de Fusión. Btu/Lb.	Calor en Líquido a Temperatura de Fusión. Btu Por Lb.	Promedio de Temperatura de Vaciado en °F.	Cantidad de Calor en - trefquido a Temperatura de Vaciado en ° F.
Aluminio	0.248	1215	286.0	169.0	455.0	1380	497.0
Antimonio	0.054	1166	39.7	70.0	129.7	1320	138.0
Babbitt-Base Plomo	0.039	462	15.8	26.2	42.0	625	48.0
Babbitt-Base Estaño	0.071	464	28.6	34.1	67.7	916	91.0
Bismuto	0.033	418	15.1	18.5	33.6	620	37.2

CAPITULO V.

LADRILLOS REFRACTARIOS

CAPITULO V.

LADRILLOS REFRACTARIOS

La construcción de los hornos para procesos metalúrgicos requiere materiales refractarios que soporten las temperaturas elevadas, acciones químicas severas, y otras condiciones características de los procesos. Se encuentra una amplia variedad de condiciones de servicio, no sólo al ir de un proceso a otro sino también en diferentes partes del horno utilizado para un proceso cualquiera. En algunas aplicaciones, el requerimiento principal puede ser infusibilidad a temperaturas extremas. En otras, la resistencia al ataque químico por una determinada clase de escoria puede ser el factor más importante. Las propiedades mecánicas tales como la resistencia a la compresión a temperaturas elevadas o resistencia a la abrasión y a la erosión por el polvo, juegan papeles importantes en ciertas aplicaciones. La conductibilidad térmica debe ser baja para algunos usos y elevada para otros. Para la mayoría de las aplicaciones individuales, se debe considerar una combinación de estos y otros requerimientos. Por consiguiente, se ha producido una amplia variedad de materiales refractarios para llenar las necesidades de los metalurgistas, y los fabricantes de refractarios trabajan continuamente con el metalurgista en un esfuerzo para desarrollar mejores materiales para propósitos específicos.

Para el ingeniero metalúrgico, la apropiada selección y uso de los materiales refractarios es, con frecuencia, vital para el éxito o el fracaso de un proceso. Antiguamente, algunos procesos atractivos en otros aspectos han fallado o han sido sustituidos debido primordialmente a que los materiales disponibles para la construcción del aparato no soportaban las condiciones del proceso. Una selección apropiada de los refractarios, diseño de los hornos y mantenimiento y reparación de los refractarios durante la operación del horno, representa un reto constante al intento del ingeniero para lograr un costo de operación mínimo.

Las propiedades de los materiales refractarios afectan varios aspectos de la manera en que se conduce el proceso mismo. Puede ser necesario, por ejemplo, controlar la temperatura, composición gaseosa, o composición de la escoria para el proceso con el propósito de evitar o reducir al mínimo las reacciones con los refractarios. En la mayoría de los procesos metalúrgicos, se da por hecho que la operación se realiza a la presión atmosférica debido a que con los refractarios no se puede lograr una hermeticidad gaseosa a temperaturas elevadas. Las propiedades de los materiales refractarios limitan directamente la forma y dimensiones del horno y afectan a todas las manipulaciones mecánicas de los procesos metalúrgicos tales como carga, sangrado, despumado, soplado, etc.

PROPIEDADES DEL REFRACTARIO.

El comportamiento en servicio de los refractarios se determina en gran parte por la habilidad y buen juicio ejercidos al equiparar las propiedades del refractario a las condiciones descritas específicas para el servicio. En particular, es esencial considerar los diversos medios en los que las condiciones del proceso pueden ocasionar una falla. Por consiguiente, la lista de propiedades consideradas al seleccionar y utilizar refractarios incluye no sólo las propiedades físicas y químicas directas, tales como densidad, calor específico, conductibilidad térmica, y análisis químico, sino también otras propiedades complejas relacionadas primordialmente con los diversos mecanismos de falla. A continuación se proporciona una lista de las propiedades más importantes de los refractarios y otros atributos que conciernen al usuario de materiales refractarios.

- I). Composición y estructura.
 - a). Análisis químico.
 - b). Estructura, textura y constitución de fase.

- II). Propiedades de servicio.
 - a). Temperaturas de fusión y de ablandamiento.
 - b). Resistencia al ataque químico.
 - c). Expansión y contracción.
 - d). Resistencia al desconchamiento.
 - e). Capacidad para soportar carga.
 - f). Resistencia a la abrasión.

III). Otras propiedades físicas.

- a). Conductividad térmica.
- b). Resistencia a la trituración en frío y módulo de rotura.
- c). Peso específico, porosidad, permeabilidad.
- d). Calor específico.
- e). Conductividad eléctrica.

IV). Costos.

- a). Materiales.
- b). Fabricación.
- c). Mantenimiento.
- d). Costos indirectos y otros.

COMPOSICION Y ESTRUCTURA.

En el análisis final, las propiedades de servicio y propiedades físicas importantes se determinan por la composición química y por la estructura y constitución de fase del cuerpo refractario. La composición se expresa usualmente dando el análisis químico en porcentaje de los óxidos componentes como % de SiO_2 , % de MgO , % de Al_2O_3 , etc. En muchos casos, por supuesto, los óxidos individuales no se encuentran presentes como tales, sino que están combinados químicamente con otros óxidos. La composición proporciona la base principal de clasificar a los materiales refractarios como ácidos, básicos y neutrales, y los nombres comunes para la mayoría de los materiales se refieren a los constituyentes óxidos más comunes, como,

por ejemplo, ladrillo de sílice, ladrillo de alta alúmina, refractarios a base de cromo, etc.

La estructura de un cuerpo refractario implica granos y cristales sólidos en una matriz o magma vítreo. La matriz puede ser un cristal, una masa finamente cristalina, o una mezcla, y actúa como un cemento o liga para los granos primarios del material refractario. En general, la matriz no llena enteramente el espacio entre los granos de material refractario, de manera que la estructura en conjunto es porosa. Para obtener el cuerpo refractario se parte de una mezcla natural o combinada de un constituyente refractario primario granular y relativamente puro con otros constituyentes que se combinan para formar la matriz cuando se calienta el cuerpo. La formación de la liga se efectúa generalmente caldeando o calentando a una temperatura lo bastante elevada para formar un líquido de constituyentes de ligazón. Dependiendo de la temperatura y tiempo de calentamiento, se puede disolver en este líquido más o menos del constituyente refractario primario. Cuando se enfría el cuerpo, este líquido puede volverse simplemente una fase vítreo de enlace o se puede cristalizar. De esta manera, el magma o liga de un cuerpo refractario es la porción menos refractaria de la estructura y es la porción donde ocurre primero la formación de líquido cuando el cuerpo está en servicio a temperaturas elevadas.

PROPIEDADES DE SERVICIO Y SU MEDICION.

Los cuerpos refractarios fallan en servicio en una variedad de formas y por una variedad de causas, y no es poco común que el mecanismo de la falla sea complejo y mal comprendido. Sin embargo, se reconocen fácilmente ciertas causas iniciales de la falla, tales como ablandamiento y fusión, ataque químico por escorias, desconchamiento térmico, falla mecánica bajo carga y abrasión.

Las temperaturas de fusión y ablandamiento lógicamente vienen primero en la lista de propiedades de servicio, ya que el primer requerimiento para un material refractario es que soporte las temperaturas elevadas a las que se debe usar. La palabra refractaridad es usada con frecuencia, aunque posiblemente de una manera vaga, para referirse a la habilidad de un material para soportar temperaturas elevadas. Los cambios en las propiedades mecánicas del material, ablandamiento y eventualmente fusión, pueden ocurrir gradualmente sobre un rango de temperaturas considerables, por lo que la especificación de cualquier temperatura como la temperatura de ablandamiento o fusión es bastante arbitraria y muy dependiente del procedimiento de ensayo y sobre la clase de observaciones hechas para detectar el ablandamiento y la fusión.

El método más ampliamente usado, para medir el comportamiento de ablandamiento a temperaturas elevadas, ha sido la determinación del Cono

Pirométrico Equivalente (CPE), por el procedimiento estandarizado como Ensayo ASTM C-24. Al determinar el CPE, se pulveriza la muestra a una malla menor de 65 y entonces se conforma en un cono de ensayo con la forma y dimensiones mostradas en la figura 5.1. Como aglutinantes al hacer los conos se utiliza agua y pequeñas cantidades de dextrina o cola. Estos conos se montan sobre una placa inerte junto con una serie de Conos Pirométricos Estándar con los que se compara el comportamiento de la muestra. La placa se calienta entonces a una velocidad especificada en un horno con distribución de temperaturas uniforme y de preferencia una atmósfera oxidante o neutral. El ablandamiento de un cono se indica cuando el cono se dobla hasta que su punta toca a la placa. El CPE de la muestra de ensayo es el número del cono Pirométrico Estándar que corresponde más de cerca en tiempo de ablandamiento con el cono de ensayo. Aunque este procedimiento no mide realmente las temperaturas de ablandamiento sino el comportamiento al ablandamiento en comparación con materiales estándar durante un ciclo de calentamiento, ya que el comportamiento de los cono estándar ha sido medido cuidadosamente. La tabla 5.1 da las temperaturas correspondientes a los puntos finales de los conos estándar medidos bajo velocidades de calentamiento conocidas.

La resistencia al ataque químico, especialmente por las escorias, es del todo importante en la elección de materiales para muchos usos metalúrgicos, ya que aún con los materiales más apropiados la corrosión es una

**TABLA 5-1. TEMPERATURAS DE PUNTO FINAL DE
LOS CONOS PIROMETRICOS AMERICANOS**

VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO:

150° C por hora para conos 022 a 20

100° C por hora para conos 23 a 38

Número de cono	Punto ° F	final ° C	Número de cono	Punto ° F	final ° C
022	1121	605	10	2381	1305
021	1139	615	11	2417	1325
020	1202	650	12	2435	1335
019	1220	660	13	2462	1350
018	1328	720	14	2552	1400
017	1418	770	15	2615	1435
016	1463	795	16	2669	1465
015	1481	805	17	2687	1475
014	1526	830	18	2714	1490
013	1580	860	19	2768	1520
012	1607	875	20	2786	1530
011	1661	905	23	2876	1580
010	1643	895	26	2903	1595
09	1706	930	27	2921	1605
08	1742	950	28	2939	1615
07	1814	990	29	2984	1640
06	1859	1015	30	3002	1650
05	1904	1040	31	3056	1680
04	1940	1060	32	3092	1700
03	2039	1115	32 $\frac{1}{2}$	3137	1725
02	2057	1125	33	3173	1745
01	2093	1145	34	3200	1760
1	2120	1160	35	3245	1785
2	2129	1165	36	3290	1810
3	2138	1170	37	3308	1820

de las primeras causas en la falla de los refractarios. Los óxidos refractarios comunes son los mismos óxidos que los que forman las escorias, por lo que sólo muy raramente es posible hallar un refractario que sea insoluble en la escoria.

Cuando una escoria permanece en contacto con una pared refractaria por cualquier período de tiempo, la acción entre las dos no se confina generalmente a una intercarga geométrica que las separa, sino que en lugar de esto resulta usualmente en el desarrollo de varias zonas de transición desde el interior de la escoria homogénea al interior inafectado de la pared. Estas zonas varían grandemente en naturaleza y espesor de un caso al otro, pero es lo que sucede en estas zonas lo que determina la velocidad de corrosión de la pared.

Las expansiones y contracciones de varias clases deben ser consideradas para explicar el comportamiento de servicio de los refractarios. En primer lugar, hay la expansión ordinaria con la temperatura en aumento y la contracción con la temperatura decreciente característica de todos los sólidos y medida por el coeficiente de expansión térmica. Además, están los cambios dimensionales que ocurren bajo cargas, tanto por deformación elástica como por deformación plástica. La expansión térmica y deformación elástica simples son reversibles, en que el sólido retorna a sus dimensiones originales cuando se restauran la temperatura o carga originales.

La deformación plástica o flujo bajo carga, por otra parte, es irreversible y causa cambios dimensionales permanentes. Al tratar con ladrillos y otros cuerpos refractarios, sin embargo, aún otros tipos de expansión y contracción juegan con frecuencia los papeles principales. Son particularmente importantes los cambios de volumen que acompañan a los cambios alotrópicos en las fases sólidas y los cambios de volumen asociados con los cambios en la estructura y constitución de fase del cuerpo.

El coeficiente de expansión de los cuerpos refractarios varía como regla con la temperatura, por lo que es más conveniente mostrar el comportamiento de expansión por medio de curvas de expansión. Estas curvas muestran una expansión lineal reversible total en porcentaje desde la temperatura ambiente a las temperaturas indicadas por las abscisas. El coeficiente real de la expansión térmica a cualquier temperatura es proporcional a la pendiente de la curva a esa temperatura.

La prueba ASTM C-113, denominada "Reheat Change of Refractory Brick", permite un procedimiento estándar para medir los cambios irreversibles que ocurren como resultado del calentamiento únicamente.

El desconchamiento de un ladrillo u otro cuerpo refractario implica la fragmentación y fractura que se produce en la vecindad de la superficie, de tal manera que los fragmentos se pierden, exponiendo en forma progresiva nuevas superficies y ocasionando eventualmente la falla.

La causa primordial del desconchamiento es el esfuerzo formado en el ladrillo de los gradientes de temperatura. Estos gradientes ocasionan una expansión desigual en partes diferentes del ladrillo y si el gradiente de temperatura y el coeficiente de expansión térmica son lo bastante grandes, esta expansión diferencial generará esfuerzos lo bastante grandes para causar la falla por cizallamiento o por tensión. Durante el calentamiento y enfriamiento se generan gradientes de temperatura mucho más grandes y así, esfuerzos también más grandes. También pueden resultar esfuerzos elevados cuando el calentamiento o enfriamiento pasa por una temperatura a la cual ocurre un cambio alotrópico, con un cambio de volumen repentino en una zona de temperaturas pequeñas. El desconchamiento que resulta de estos factores se conoce como desconchamiento térmico y el término resistencia al desconchamiento se refiere usualmente de manera primordial a la resistencia al desconchamiento térmico.

El desconchamiento mecánico es causado por fuerzas mecánicas externas actuando sobre un ladrillo. Si se construye una pared sin provisión adecuada para la expansión térmica, los ladrillos en algunas partes de la pared pueden ser sobrecargados mecánicamente y así pueden tender a fracturarse por desconchamiento.

La capacidad para soportar cargas a temperaturas elevadas es una propiedad crítica en la elección de un material refractario para un arco de bóveda que es soportado por una fuerza compresiva constante aplicada a los costados. Los ladrillos en las paredes de hornos deben, por supuesto, soportar el peso de los ladrillos y otras partes superiores, pero la capacidad de soportar carga a temperaturas elevadas no es frecuentemente crítica aquí, porque en el diseño de hornos ordinario, el grueso del peso es soportado por las partes más frías de la pared. La naturaleza de la falla bajo carga, se relaciona estrechamente a varias de las propiedades de servicio ya discutidas: temperatura de ablandamiento, expansión y contracción y resistencia al desconchamiento.

La prueba estandar para el comportamiento de los refractarios bajo carga a temperatura elevada, Ensayo ASTM C-16, consiste en calentar especímenes de ensayo de acuerdo a un programa fijado tiempo-temperatura bajo una carga compresiva de 25 lb/plg². Las longitudes de las muestras se miden a temperatura ambiente antes y después del calentamiento, y la deformación se expresa en porcentaje de la longitud original. Si el ladrillo falla por cizallamiento durante el programa de calentamiento, se informa sobre la temperatura de la falla. Aunque esta prueba no mide en forma alguna la magnitud de la carga que puede ser aplicada a un refractario bajo condiciones de trabajo, se ha encontrado, sin embargo, que los resultados

del ensayo sirven bien como medidas comparativas de la capacidad para soportar cargas y como la base para especificaciones y control de calidad.

La resistencia a la abrasión y la tenacidad mecánica deben ser proporcionadas a las partes de hornos que están continua o frecuentemente en contacto con materiales u objetos sólidos en movimiento. En varias clases de hornos verticales, que se caracterizan por el manejo de materiales de alimentación en trozos, la abrasión es especialmente severa. Los hornos rotatorios son otros aparatos comunes que se caracterizan por una abrasión severa. Los gases que transportan sólidos en suspensión pueden presentar un problema de abrasión, especialmente en lugares donde la velocidad del gas es alta o dirigida hacia la superficie. Es probable que el comportamiento de servicio anterior sea la guía del metalurgista para la selección de los materiales.

Otras propiedades físicas. Además de las propiedades de servicio que se acaban de discutir, las cuales se relacionan primordialmente a las causas de las fallas de los refractarios, el usuario de los materiales refractarios necesita datos sobre cierto número de propiedades físicas generales de los materiales sólidos.

La resistencia al aplastamiento en frío y el módulo de ruptura, según se determina por el Ensayo ASTM C-133, dan alguna indicación de cómo

soportarán los ladrillos el manejo y embarque y las cargas mecánicas a temperaturas bajas. Además, estas propiedades mecánicas sirven como cierta medida de la extensión en que se ha desarrollado la liga cerámica en la cocción y algunas veces pueden ser correlacionadas con ciertas características de sensibilidad en servicio de la estructura del ladrillo.

La densidad volumétrica de un cuerpo refractario es su peso dividido por el volumen total incluyendo poros y es la cifra utilizada en diversos cálculos de ingeniería sobre peso y volumen de estructuras refractarias. El peso específico verdadero o densidad verdadera se refiere al refractario sólido, excluyendo a los poros. El peso específico aparente se mide por inmersión en un fluido que penetra en los poros abiertos del cuerpo, y de esta manera se refiere al refractario sólido incluyendo los poros cerrados. La porosidad y porosidad aparente (poros abiertos) se calculan fácilmente a partir de estos pesos específicos.

La conductividad eléctrica es de interés primordial en conexión con materiales usados en hornos eléctricos. Deberá observarse que dos materiales refractarios bastante comunes, el grafito y el carburo de silicio, son relativamente buenos conductores y son muy útiles como elementos de resistencia calefactoras.

COSTOS.

En el análisis final, el costo debería ser el factor determinante en la elección de los refractarios para procesos metalúrgicos. Sin embargo, este criterio se declara más fácilmente que se practica, debido a las dificultades para establecer y predecir algunos de los costos principales. Un bajo costo inicial para los materiales refractarios es necesariamente una de las consideraciones primordiales en la construcción de hornos grandes y esto explica el hecho de que los refractarios arcillosos y los refractarios de alto contenido en sílice representan más del 90% del tonelaje total de refractarios utilizados por la industria metalúrgica.

Un análisis detallado de los costos de refractarios queda fuera del intento de esta tesis.

REFRACTARIOS METALURGICOS.

CLASIFICACION.

Una base empleada desde hace tiempo para clasificar materiales, está relacionada estrechamente con la clasificación de las escorias en términos de basicidad y acidez. Siguiendo este sistema, los materiales altos en SiO_2 se consideran ácidos, los altos en CaO o MgO son básicos, y óxidos, tales como Al_2O_3 , Cr_2O_3 y los no óxidos C y SiC se considera que forman refractarios neutrales. Como una aproximada

generalización de trabajo, los refractarios ácidos se emplean en contacto con escorias ácidas y los refractarios básicos en contacto con escorias básicas, mientras que los refractarios neutrales se consideran resistentes a las escorias tanto ácidas como básicas.

Una clasificación conveniente de los materiales refractarios, basada mayormente sobre su composición química, es la siguiente:

- I) Refractarios de Sílice-alúmina.
 - a. Alto sílice.
 - b. Arcilla refractaria.
 - c. Alto en alúmina.
- II) Refractarios básicos.
 - a. Magnesita y dolomita.
 - b. Cromo, cromo-magnesita, y magnesita-cromo.
 - c. Forsterita.
- III) Refractarios aislantes.
- IV) Refractarios especiales.
 - a. Carbono y grafito.
 - b. Carburo de silicio.
 - c. Circón y circonia.
 - d. Artículos de laboratorio.
 - e. Misceláneos.

Todos los tipos enlistados tienen aplicaciones metalúrgicas importantes, pero, con mucha aproximación, la tabulación anterior está en orden de especialización de aplicación ascendente, tonelaje de materiales empleados descendente, y costo unitario ascendente.

La manufactura de ladrillos y otras formas partiendo de arcillas refractarias, implica cierto número de pasos, principalmente (1) mezclado y batido, (2) atemperado con agua, (3) formado o moldeado, (4) secado, y (5) cocción. Aunque superficialmente ésto puede parecer un procedimiento simple, en realidad representa un arte complejo con muchos factores y variables en cada etapa que influyen la naturaleza y propiedades del producto final. De esta manera, el ladrillo cocido no es un producto simple de propiedades estandarizadas, sino que está hecho con muchas combinaciones diferentes de propiedades para llenar los requerimientos específicos de servicios diferentes. Evidentemente, las composiciones y propiedades de las arcillas refractarias empleadas como materias primas, serán factores principales en la determinación de las propiedades del producto, pero además, se puede hacer mucho en la manufactura para desarrollar y aumentar propiedades específicas.

Los ladrillos de arcilla refractaria se clasifican primordialmente de acuerdo a su refractaridad como super refractario, muy refractario, medianamente refractario y ligeramente refractario. La ASTM da especificaciones estándar para estas cuatro clases, como sigue:

TABLA 5-2. ANALISIS QUIMICOS DE ARCILLAS REFRACTARIAS TIPICAS*

	Silfcea de Nueva Jersey	Siflex de Penna.	Plástica de Penna.	Semi-Plástica de Penna.	Siflex de Ohio	Plástica de Ohio	Plástica de Missouri	Siflex de Missouri	Díasporo	Bauxita	Caolín de Georgia	Siflex de Maryland
S ₁ O ₂	77.7%	43.1%	44.6%	46.2%	45.1%	54.3%	56.8%	42.7%	20.5%	18.9%	45.9%	56.1%
Al ₂ O ₃	15.7	39.4	37.3	36.3	34.1	27.0	26.6	39.7	60.9	52.5	37.0	33.3
Fe ₂ O ₃	0.5	1.3	1.2	1.6	2.3	2.4	1.6	1.1	0.6	4.4	1.1	0.6
TiO ₂	-	2.0	2.2	2.2	2.1	2.0	1.7	2.2	3.1	2.7	1.3	-
CaO	Vestigio	0.1	0.3	0.2	0.25	0.2	0.4	0.1	0.4	3.2	0.3	0.2
MgO	0.8	0.1	0.4	0.3	0.5	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.2	0.1
Alk	Vestigio	0.2	1.6	1.7	1.4	1.6	0.1	0.2	1.3	0.4	0.8	-
Pérdida por Ignición	5.6	13.6	12.7	11.5	12.8	9.3	12.1	73.8	13.1	17.9	12.7	9.7
PCE*	27-28	33-34	32-33	32	32-33	29	30	34-35	40	34	33-34	33

* Cono pirométrico equivalente.

Super refractario:

- . CPE no menor del No. 33 en el producto cocido.
- . Menos del 1% de contracción en la prueba de recalentamiento a 1,600° C.
- . Menos del 4% de pérdida en peso en el ensayo de desconchamiento, ladrillo precalentado a 1,650° C.

Muy refractario:

- . CPE no menor de los Nos. 31-32 o menos del 1.5% de deformación en el ensayo bajo carga a 1,350° C.

Medianamente refractario:

- . CPE no menor del No. 29 o menos de 3% de deformación bajo carga a 1,350° C.

Ligeramente refractario:

- . CPE no menor del No. 19.

REFRACTARIOS AISLANTES.

Las bajas conductibilidades térmicas y las buenas propiedades aislantes se logran primordialmente en materiales de gran y bien distribuida porosidad y baja densidad volumétrica, sin importar mucho la composición química.

Para hornos metalúrgicos aislantes, se debe combinar la baja conductibilidad térmica con la habilidad para soportar temperaturas elevadas sin descomposición o cambios estructurales. El hecho de que vayan equiparadas bajas densidades volumétricas y peso ligero con baja conductibilidad térmica y gran porosidad, es, por supuesto, muy ventajoso en ciertos tipos de construcción de hornos. Hasta el extremo de que estos materiales de peso ligero se pueden emplear en lugar de refractarios estándar, cimentaciones de hornos, partes estructurales de acero, mecanismos de puertas y otras partes de soporte que pueden ser de construcción más ligera. Los materiales aislantes se añaden como capas adicionales del horno con el fin principal de ahorrar calor.

Los aislantes para temperaturas elevadas pueden obtenerse en varias formas diferentes, teniendo cada una su propio campo de uso particular. Estas formas incluyen material granular suelto o terroso, ladrillos aislantes y material moldeable mezclado con agua y vaciado, apisonado, o aplanado en su lugar como concreto. La ASTM ha preparado una clasificación de ladrillos refractarios (ASTM C-155) como Grupos 16, 20, 23, 26 y 28, representando estos números las máximas temperaturas a las que se deben exponer estos ladrillos, en cientos de grados Fahrenheit. La tabla 5-3 da las propiedades de los ladrillos aislantes proporcionados por un fabricante.

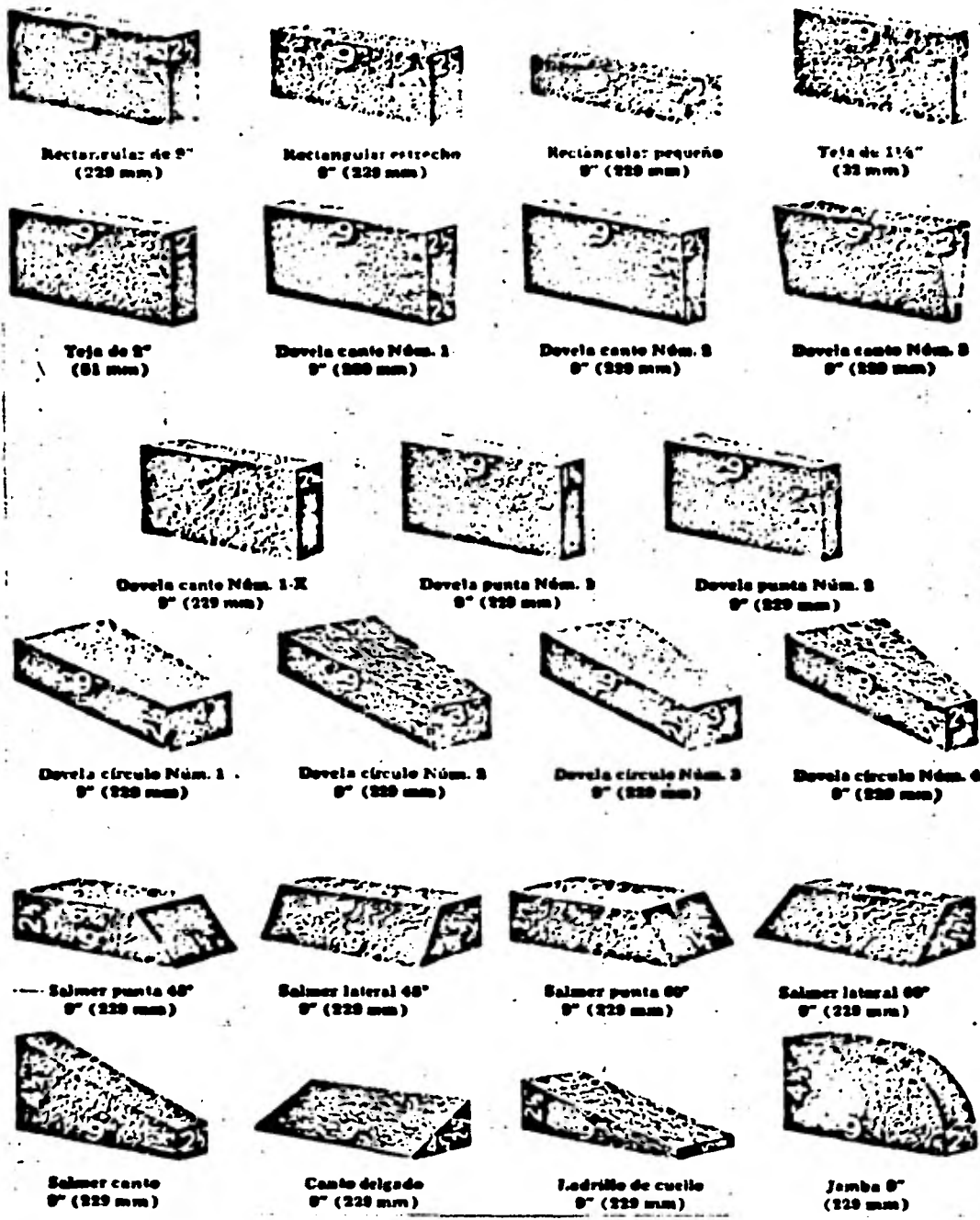


FIGURA 5-3. Tamaños estándar de ladrillos refractarios de 9 x 4 1/2 x 2 1/2 plg. (Cortesía de la Hagbison-Walker Refractories Company)

La adición de aislante al exterior de hornos existentes tiene varias consecuencias, además de reducir las pérdidas caloríficas, y se las debe considerar con cuidado antes de añadir el aislante. Los cálculos del flujo térmico muestran que una capa aislante que realiza una reducción sustancial de la pérdida calorífica, responderá automáticamente de una porción sustancial de la caída de temperatura total desde el interior del horno a los alrededores.

CONSTRUCCION DE HORNOS METALURGICOS.

LADRILLOS, BLOQUES Y OTRAS FORMAS.

El ladrillo estandar empleado en mayores cantidades para la construcción de hornos, es el "recto de 9 plg", que es un ladrillo rectangular midiendo $9 \times 4 \frac{1}{2} \times 2 \frac{1}{2}$ plg. Además, hay muchos otros tamaños y formas que se emplean en cantidades suficientes para justificar la producción en masa y la estandarización. En realidad, el ladrillo rectangular de 9 plg., es uno de cierto número de tamaños de $9 \times 4 \frac{1}{2} \times 2 \frac{1}{2}$ plg., como muestra en la fig. 5-3.

**TABLA 5-3 PROPIEDADES DE LOS LADRILLOS
REFRACTARIOS AISLANTES**

	Número del ladrillo					
	K-16	K-20	K-23	K-26	K-28	K-30
Densidad volumétrica, lb/pie ³	18.8	25.3	25.9	41.6	42.5	50.5
Conductibilidad térmica, Btu-pie/hr-pie ² -° F						
Temp. media: 500° F	0.058	0.075	0.070	0.122	0.119	0.163
1 000° F	0.079	0.098	0.091	0.153	0.147	0.208
1 500° F	0.103	0.122	0.112	0.193	0.177	0.262
2 000° F	---	---	0.138	0.258	0.212	0.338
Resistencia a la trituración en frío, lb/plg ²	48	95	117	154	148	308
Contracción en el recalentamiento, ASTM C-210 % ° F	1550 0.1	1950 0.1	2250 0.6	2550 0.4	2750 0.6	2800 0.5

Todos los materiales refractarios discutidos previamente que se emplean en grandes cantidades, se obtienen en estas formas estandar. Otro grupo similar de formas estandar es el Grupo de 9 x 4 1/2 x 3 plg. La designación del Grupo representa las dimensiones del ladrillo de 9 plg. recto. Muchos otros tamaños y formas se encuentran estandarizados, especialmente en los refractarios de arcilla, y algunos tamaños y formas se hacen primordialmente para una sola clase de horno, tal como para los bloques de cubilote, bloques para piso de alto horno, bloques para hornos rotatorios, etc.

Morteros y cementos.

Los morteros y cementos se emplean para formar las juntas al colocar los ladrillos. La mayoría de estos materiales se compran secos y entonces se les mezcla con agua para obtener la consistencia apropiada antes de usarlos. La mezcla resultante se aplica por medio de cuchara, inmersión, o vertido. Para trabajos con ladrillos refractarios, es deseable de ordinario hacer las juntas tan delgadas como sea posible, con el mayor contacto posible de ladrillo a ladrillo. En algunos tipos de construcción comunes, se colocan los ladrillos sin mortero y se sellan las juntas por enlechado o por las reacciones ligantes entre los ladrillos que se producen cuando se coloca en operación el horno a temperatura elevada. La selección del mortero apropiado

y de la técnica de hacer las juntas son factores muy importantes en el comportamiento en servicio de una estructura refractaria, necesitándose tanto cuidado como el que se ejerce en la selección del ladrillo refractario.

Una de las propiedades importantes del mortero, es, por supuesto, el Cono Pirométrico Equivalente (CPE) o temperatura de ablandamiento, que se mide por la prueba ASTM C-24.

Los morteros y cementos, independientemente de la materia prima de base, son de dos tipos amplios: de fraguado en caliente y de fraguado al aire. Los morteros de fraguado en caliente forman una fuerte liga sólo después del caldeo y hacen una liga cerámica del mismo tipo esencialmente que la desarrollada al cocer un ladrillo u otro cuerpo refractario.

A continuación se darán a conocer algunos ladrillos refractarios, morteros y ladrillos aislantes con propiedades físicas, mecánicas y químicas recomendables para este tipo de horno, así como, una tabla con los tamaños estandar de ladrillos refractarios.

LADRILLO REFRACTARIO ALTA CALIDAD

Equivalente al Cono Pirométrico Orton		33	-	34
D. G. N.	C-126-1974			
Equivalente de temperatura (aprox.)		1745	-	1760° C
		3170	-	3200° F
Cambio lineal permanente	%	0.50		05 E
D. G. N.	C-124-1973			
	(1600° C)			
	(2910° F)			
Deformación bajo carga	%			
D. G. N.	C-176-1974			
	(1450° C)			
	(2640° F)	1.0	-	3.0
Prueba de disgregación	%			
D. G. N.	C-189-1970			
	(1650° C)			
	(3000° F)	2	-	.6
Porosidad aparente	%			
D. G. N.	C-182-1975	11	-	15
Absorción de agua	%			
D. G. N.	C-182-1975	6	-	7.5

Módulo de ruptura		Kg/cm ²	120	-	175
D.G.N.	C-128-68	Lb/pulg ²	1700	-	2500
Prueba de compresión					
en plano		Kg/cm ²	422	-	633
D.G.N.	C-181-1969	Lb/pulg ²	6000	-	9000
Densidad					
D.G.N.	C-182-1975	g/cm ³	2.25	-	2.35
Análisis químico:					
D.G.N.	C-195-1975	Sílice	51.5	-	53.5
		Alúmina	42.5	-	45
		Oxido de fierro	1	-	2

LADRILLO REFRACTARIO ALTA ALUMINA

(85% Alúmina)

Equivalente al Cono Pirométrico Orton

D.G.N.	C-126-74		39	-	40
Equivalente de temperatura					
			3389	-	3425° F
			1865	-	1885° C
Cambio lineal permanente		1600° C			
D.G.N.	C-122-1973	2910° F	%	0.4	- 1.4C
Deformación bajo carga		2640° F			
D.G.N.	C-176-74	1450° C	%	0.5	- 1.5C
Prueba de disgregación		3000° F	%		
D.G.N.	C-189-1970	1650° C		0.0	- 1
Porosidad aparente			%		
D.G.N.	C-182-1975			20	- 22
Absorción de agua			%		
D.G.N.	C-182-1975			7	- 9
Módulo de ruptura		Kg/cm ²		105	- 155
D.G.N.	C-128-68	Lb/pulg ²		1500	- 2200
Prueba de compresión					
en plano		Kg/cm ²		703	- 915
D.G.N.	C-181-1969	Lb/pulg ²		10000	- 13000
Densidad		g/cm ³		2.80	- 2.90
D.G.N.	C-182-1975				

Análisis químico:

D.G.N.	C-195-1975	Sflice	8.5	-	11.0
		Alúmina	83.5	-	86.57
		Oxido de fierro	1.0	-	2.0
		Oxido de calcio	0.08	-	0.11
		Oxido de magnesio	0.15	-	0.25
		Oxido de titanio	2.6	-	3.5
		Alcalis	0.15	-	0.2

**MORTERO DE FRAGUADO AL AIRE
DE 85% DE ALUMINA**

Temperatura máxima recomendada	1650° C
	3000° F
Refractabilidad	Sin reblandecimiento
D.G.N. C-224-1972 1650° C	Sin escurrimiento
Cantidad necesaria para colocar 1,000 ladrillos	200 - 250 Kg
Agua necesaria para aplicación con cuchara de albañil	0 - 2 lts.
Módulo de ruptura	
D.G.N. C-179-1975	
Aplicado en DV-38 M o equivalente	
Seco	800 - 1200 lb/in²
815° C	400 - 600
1400° C	200 - 300
Retención de agua	15 minutos mínimo
Tamaño de partícula	
D.G.N. C-212-1971	
-20	0.5% máx.
-35	5.0 máx.

Análisis químico:

D.G.N. C-195-1975

Base calcinado

Silice	7	-	9
Alúmina	84	-	87
Oxido de fierro	2.5	-	3.5
Oxido de calcio	0	-	0.1
Oxido de magnesio	0	-	0.1
Oxido de titanio	3.0	-	4.0
Alcalis	0	-	0.1

LADRILLO AISLANTE

Temperatura máxima recomendada		2800° F		
		1535° C		
Contracción lineal permanente %	1510° C			
D.G.N.	C-124-1973	1.0	-	0.5E
Módulo de ruptura	Lb/pulg ²	250	-	450
D.G.N.	C-137-1974	Kg/cm ²	18	- 32
Prueba a la compresión				
en plano	Kg/cm ²	56	-	70
D.G.N.	C-137-1974	Lb/pulg ²	800	- 1000
Peso volumétrico	g/cm ³	0.90	-	0.96
D.G.N.	C-147-1976			
Conductividad térmica				
Kcal/m ² /hr° C/m de espesor				
a la media temperatura de:				
205° C (400° F)		0.349		
315° C (600° F)		0.372		
425° C (800° F)		0.396		
540° C (1000° F)		0.417		

Análisis químico:

D.G.N. C-195-1975

Silice	29	-	31
Alúmina	59	-	61
Oxido de fierro	0.4	-	0.8
Oxido de titanio	0.0	-	0.1
Oxido de calcio	5	-	7
Oxido de magnesio	0.4	-	1
P.P.C.	0.05	-	1.4

LADRILLO AISLANTE

Temperatura máxima recomendada		2600° F		1425° C
Contracción lineal permanente	%			
D.G.N.	C-124-1973	1400° C	0.5	- 1.0%
Deformación bajo carga		1230° C	%	0.5 - 1.5
D.G.N.	C-176-1974			
Módulo de ruptura		Lb/pulg ²	250	- 350
D.G.N.	C-137-1974	Kg/cm ²	18	- 25
Prueba de compresión				
en plano		Kg/cm ²	42	- 63
D.G.N.	C-137-1974	Lb/pulg ²	600	- 900
Peso volumétrico		g/cm ³	0.80	- 0.85
D.G.N.	C-147-1976			
Conductividad térmica				
Kcal/m ² /hr/° C/m	de espesor			
a la media temperatura de:				
205° C (400° F)			0.287	
315° C (600° F)			0.321	
425° C (800° F)			0.353	
540° C (1000° F)			0.386	

Análisis químico:

D.G.N. C-195-1975

Sílice	36	-	38
Alúmina	48	-	50
Oxido de fierro	0.5	-	1
Oxido de titanio	0.08	-	0.5
Oxido de calcio	7	-	9
Oxido de magnesio	0.4	-	0.06
P. P. C.	0.05	-	1.5

CAPITULO V I.

TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION

CAPITULO VI.

TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACION

RADIACION TERMICA

La transferencia de calor por radiación es solamente uno de los numerosos fenómenos electromagnéticos. El término "radiación" se aplica generalmente a todas las clases de procesos que transmiten energía por medio de ondas electromagnéticas. La gama completa de tales ondas está subdividida en clases de acuerdo con la longitud de onda o la frecuencia y también de acuerdo con la aplicación. La figura 6-1 ilustra el espectro electromagnético que incluye desde las ondas eléctricas de gran longitud de onda y baja frecuencia, hasta los rayos cósmicos de longitud de onda extremadamente corta y alta frecuencia.

Hasta la fecha no ha sido completamente establecida la verdadera naturaleza de la radiación y su mecanismo de transporte. Algunos fenómenos de radiación pueden describirse en términos de la teoría ondulatoria y otros en términos de la teoría cuántica, pero ninguna teoría explica completamente todas las observaciones experimentales. Se sabe, sin embargo, que la radiación viaja en el espacio libre con la velocidad de la luz, V_1 , y que no requiere un medio intermedio para su propagación. La transferencia de energía tiene lugar en forma de pequeñas pero finitas unidades de energía conocidas como cuantos.

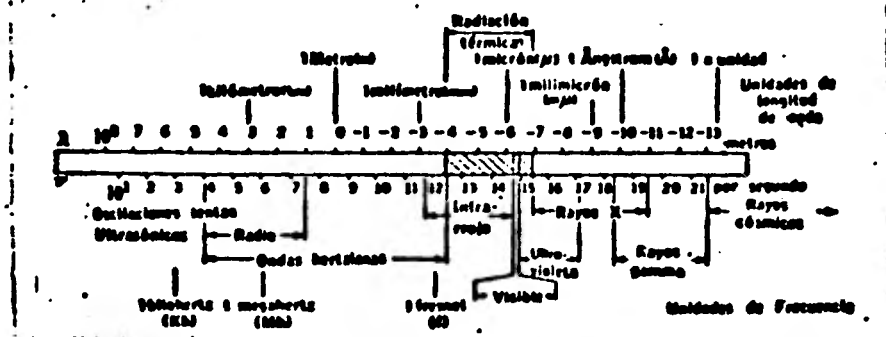


FIGURA 6-1. ESPECTRO DE ONDAS ELECTROMAGNETICAS

En el proceso de emisión de radiación, un cuerpo convierte una parte de su energía interna en ondas electromagnéticas, que constituyen una forma de energía. Estas ondas se mueven a través del espacio, hasta que chocan con otro cuerpo, donde una parte de su energía es absorbida y convertida en energía interna del cuerpo receptor, y a menos que el calor se genere dentro del cuerpo, como por ejemplo en el sol o que lo reciba de otra fuente, su temperatura decrecerá. Su temperatura permanecerá constante únicamente cuando la velocidad con que genere o reciba calor sea igual a la velocidad con que emite energía.

ABSORCION, REFLEXION, Y TRANSMISION DE RADIACION

Cuando la radiación incide sobre un cuerpo, es parcialmente absorbida, parcialmente reflejada y parcialmente transmitida, como se indica en la figura 6-2. La relación entre la energía absorbida, la energía reflejada y la energía transmitida es:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

donde α = absorbencia, ésto es, la fracción de la radiación incidente absorbida por el cuerpo

ρ = reflexibilidad, ésto es, la fracción de la radiación incidente reflejada por la superficie del cuerpo

τ = transmisividad, ésto es, la fracción de la radiación incidente transmitida a través del cuerpo.

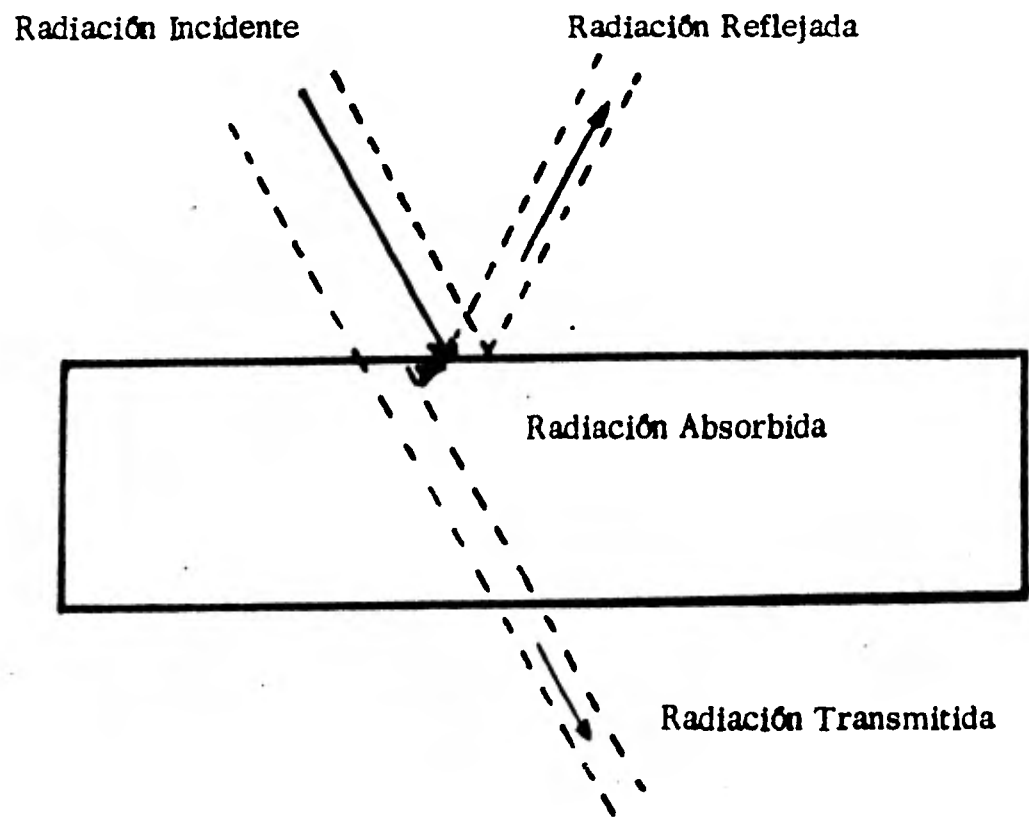


Fig. 6-2 Reflexión, Absorción y Transmisión de la Radiación.

La mayoría de los materiales sólidos que se encuentran en la práctica, absorben prácticamente toda la radiación en una capa superficial muy delgada, menor de 0.05 pulgadas de profundidad.

Los cuerpos que no transmiten radiación se llaman cuerpos opacos y para éstos, la ecuación 6-2 se reduce a:

$$\alpha + \rho = 1$$

El vidrio, la sal gema y otros cristales inorgánicos son ejemplos de excepciones entre los sólidos, porque a menos que sean muy gruesos, tienen un cierto grado de transparencia a la radiación de ciertas longitudes de onda. Muchos líquidos y todos los gases son también transparentes.

La reflexión de la radiación puede ser regular o difusa. Si una superficie está altamente pulido y lisa, la reflexión de la radiación será semejante a la de un haz de luz, es decir, el ángulo de incidencia será igual al ángulo de reflexión. A ésta se le llama reflexión regular. Muchos materiales usados en la práctica industrial son "rugosos", debido a que sus superficies tienen asperezas que son grandes comparadas con una longitud de onda. La reflexión de la radiación a partir de una superficie rugosa, ocurre prácticamente en todas direcciones y se llama reflexión difusa. Una superficie de reflexión difusa puede definirse como aquella que refleja con la misma distribución espacial de energía que un cuerpo negro. Para muchas situaciones prácticas la reflexión puede tratarse como si fuera completamente difusa.

EL CUERPO NEGRO Y LA LEY DE KIRCHHOFF

En forma semejante al gas ideal, el cuerpo negro es un concepto teórico que puede solamente aproximarse en la práctica. Un cuerpo negro o radiador ideal, puede definirse ya sea como un cuerpo que absorbe toda la radiación que incide sobre él y que no refleja o transmite ninguna o como un radiador que emite a cualquier temperatura especificada la máxima cantidad posible de radiación térmica a todas las longitudes de onda. El cuerpo negro se usa como una medida con la que se comparan las características de radiación de otros cuerpos.

El concepto del cuerpo negro puede aclararse considerando un simple experimento. Suponer que dos cuerpos pequeños B_1 y B_2 con superficies de áreas A_1 y A_2 se colocan en un recipiente grande y vacío que está perfectamente aislado de sus alrededores. Habrá intercambio de radiación entre los dos cuerpos y las paredes del recipiente, hasta que se alcance el equilibrio y ambos cuerpos y las paredes alcancen la misma temperatura. Entonces, la rapidez con la cual cada cuerpo emite radiación será igual a la rapidez con que absorben radiación. Si G es la rapidez con que la energía radiante de las paredes incide en cada cuerpo, α_1 y α_2 son las absorbencias, E_1 y E_2 el poder de emisión de B_1 y B_2 respectivamente, un balance de energía daría

$$A_1 G \alpha_1 = A_1 E_1 \quad \text{y} \quad A_2 G \alpha_2 = A_2 E_2$$

de donde

$$\frac{E_1}{\alpha_1} = \frac{E_2}{\alpha_2} = \frac{E}{\alpha}$$

para cualquier cuerpo.

Esta relación se conoce como Ley de Kirchhoff.

INTENSIDAD DE RADIACION Y PODER DE EMISION TOTAL

La radiación total emitida por un cuerpo negro en todas las direcciones puede observarse colocando una superficie semiesférica sobre un elemento de superficie dA_1 , como se muestra en la figura 6-3. Entonces, la semiesfera intersectará todos los haces de radiación emitidos por el elemento de superficie, pero únicamente visto directamente dA_1 por encima de él, se verá sin distorsión. Cuando se ve desde un punto sobre la semiesfera, desplazada por un ángulo θ de la normal a la superficie, el elemento dA_1 aparecerá como el área proyectada $dA_1 \cos \theta$.

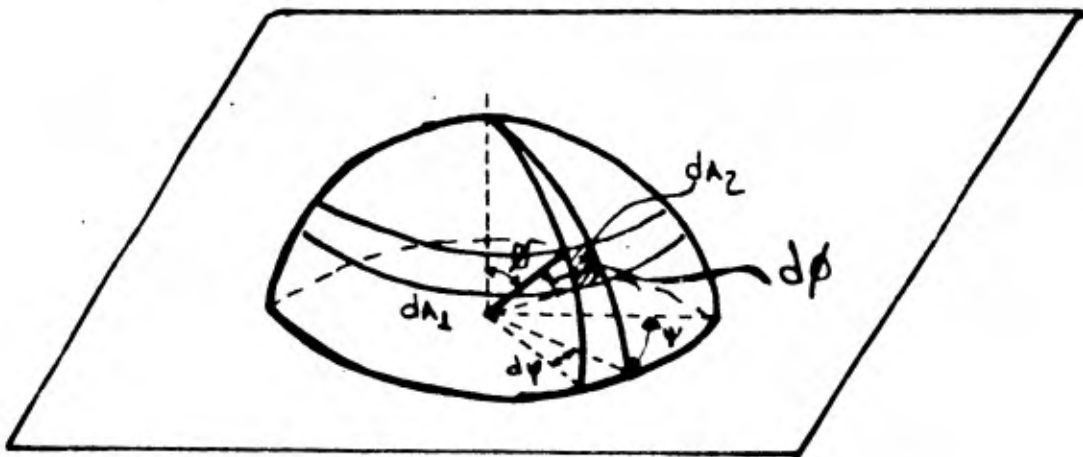


Figura 6-3. Nomenclatura para la intensidad de la Radiación.

Para determinar el calor radiante por unidad de tiempo emitido por dA_1 que alcance un área dA_2 sobre la semiesfera envolvente de radio r , se introduce un término que se llama intensidad. La intensidad de radiación I desde dA_2 en el espacio se define como la energía radiante propagada en una dirección particular por unidad de ángulo sólido y por unidad de área dA_1 proyectada sobre un plano perpendicular a la dirección de propagación. Con referencia a la figura 6-3, la intensidad también se define como la razón de flujo de calor radiante de dA_1 a dA_2 como

$$dq_{1 \rightarrow 2} = I \cos \theta \, dA_1 \, dA_2 / r^2 \quad 6-3$$

Observando que dA_2 / r^2 es el ángulo sólido $d\omega_1$ subtendido por dA_2 en dA_1 y que $dA_1 \cos \theta$ es el área efectiva vista desde dA_2 ; es decir, el área proyectada dA_{1p} en la dirección θ , se ve que

$$I = dq_{1 \rightarrow 2} / dA_{1p} \, d\omega_1 \quad \text{BTU/hr} \cdot \text{pie}^2 \text{ estereorradián}$$

RADIACION DE SUPERFICIES REALES

La radiación de superficies reales difiere en varios aspectos de la radiación del cuerpo negro. De acuerdo con la ley de Kirchhoff, una superficie real radia siempre menos energía que un cuerpo negro a la misma temperatura. Si a una temperatura dada la razón del poder de emisión monocromático del cuerpo negro al poder de emisión monocromático de un cuerpo a la misma longitud de onda es constante sobre el espectro total de longitudes de onda, se dice que el cuerpo es gris y su poder de emisión está

dado por

$$E_g = \epsilon_g \sigma T^4 \quad \text{BTU/hr pie}^2$$

La forma de una curva de espectrorradiometría para una superficie gris es semejante a la de una superficie negra a la misma temperatura, pero la altura está reducida por el valor numérico de la emisividad. Para el propósito de cálculos de transferencia de calor, generalmente las superficies se consideran grises aún cuando las características de muchas superficies no cumplen con las especificaciones de un cuerpo gris. Sieber midió la reflexibilidad de varios materiales sobre un dominio de longitudes de onda y determinó que sus valores cambian con la longitud de onda. De estas mediciones, pueden calcularse la absorbencia y la emisividad a partir de la ecuación 6-2 y de la ley de Kirchhoff. Los resultados se muestran en las figuras 6-4 y 6-5 que ilustran la variación de la absorbencia monocromática α_2 con la longitud de onda. La curva para aluminio pulido es característica de buenos conductores eléctricos y muestran que la emisividad decrece con el aumento de longitud de onda. Los materiales no conductores de la electricidad, presentan la propiedad contraria como se muestra en las curvas de emisividad para arcilla blanca y losa blanca. La emisividad de materiales no conductores aumenta generalmente en una forma más o menos irregular con el aumento de la longitud de onda.

Además de su variación con la longitud de onda, la emisividad de muchos cuerpos también tiene propiedades direccionales que no cumplen con la ley de Lambert del coseno. Esto está ilustrado en las figuras 6-6 y 6-7, donde están graficadas en diagramas polares las emisividades direccionales ρ de varias sustancias. Para superficies cuya intensidad de radiación sigue la ley de Lambert del coseno y depende únicamente del área proyectada, las curvas de emisividad podrían ser semicírculos. Las medidas de Schmidt y Eckert muestran que para materiales no conductores tales como madera, papel y películas de óxido, la emisividad decrece a valores grandes del ángulo de emisión θ ; mientras que para metales pulidos se observa la tendencia opuesta.

La tabla que se presenta en la página siguientes es una lista de valores promedio para la emisividad de varios materiales a temperaturas específicas. Debe observarse que las superficies metálicas, pulidas y limpias, usualmente tienen valores bajos de emisividad, mientras que muchas otras superficies que encuentran aplicación e ingeniería, tienen emisividades mayores de 0.85 y son, por lo tanto, excelentes absorbedores, así como emisores de radiación. Debe también ser claro que el color que se observa no muestra ninguna semejanza con la definición del cuerpo negro. Por ejemplo, el hielo que aparece blanco ante nuestros ojos, absorbe casi toda la radiación en un amplio dominio de longitudes de onda.

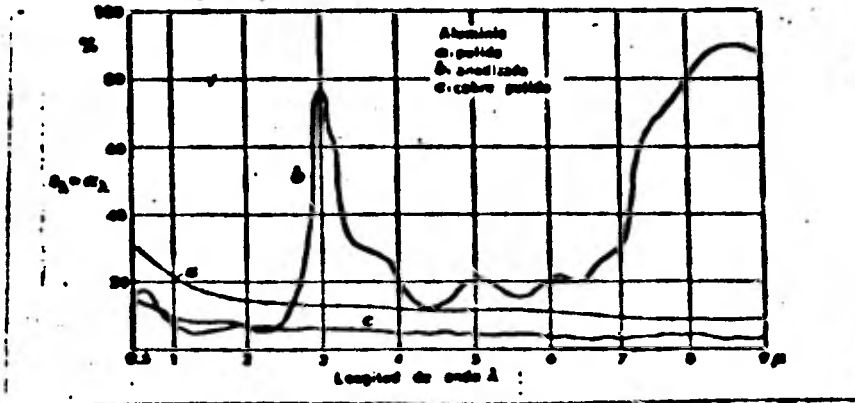


FIGURA 6-4. Variación con la longitud de onda, de la absorbencia o emisividad monocromática, para un conductor eléctrico. (De acuerdo con W. Sieber)

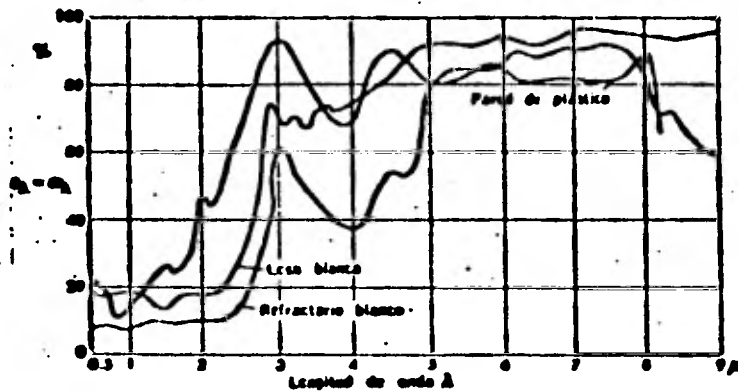


FIGURA 6-5. Variación con la longitud de onda, de la absorbencia o emisividad monocromática, para un material no conductor de la electricidad. (De acuerdo con W. Sieber)

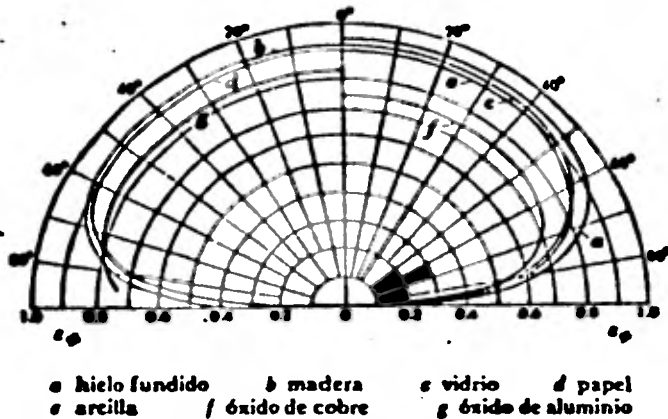


FIGURA 6-6. Variación direccional de la emisividad, para varios materiales no conductores de la electricidad. (Con permiso de E. Schmidt y E. Eckert, --- "Über die Richtungsverteilung der Wärmestrahlung", - Forsch. Gebiete Ingenieurwesen, Vol. 6, 1935)

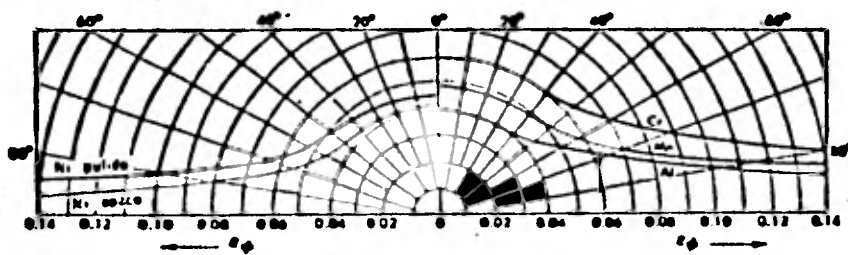


FIGURA 6-7. Variación direccional de la emisividad para varios metales. (Con permiso de E. Schmidt y E. Eckert, "Über die Richtungsverteilung der Wärmestrahlung", Forsch. Gebiete Ingenieurwesen, Vol. 6, 1935)

	LONGITUD DE ONDA Y TEMPERATURA PROMEDIO				
	9.3 100° F	5.4 500° F	3.6 1,000° F	1.8 2,500° F	0.6 Solar
Merales:					
Aluminio					
Pulido	0.04	0.05	0.08	0.19	0.3
Oxidado	0.11	0.12	0.18		
24-ST intemperizado	0.4	0.32	0.27		
Superficie para techado	0.22				
Anodizado (a 1,000° F)	0.94	0.42	0.60	0.34	
Bronce					
Pulido	0.10	0.10			
Oxidado	0.61				
Cromo					
Pulido	0.08	0.17	0.26	0.40	0.49
Cobre					
Pulido	0.04	0.05	0.18	0.17	
Oxidado	0.87	0.83	0.77		
Fierro					
Pulido	0.06	0.08	0.12	0.25	0.45
Fundición, oxidado	0.63	0.66	0.76		
Galvanizado, nuevo	0.23	....	....	0.42	0.66
Galvanizado, sucio	0.28	....	....	0.90	0.89
Acero en placa, rugosa	0.94	0.97	0.98		
Oxido	0.96	....	0.85	....	0.74
Fundido .....	....	....	....	0.3-0.4	
Magnesio	0.07	0.13	0.18	0.24	0.30
Molibdeno en filamento .....	....	....	0.09	0.15	0.2*
Plata					
Pulida	0.01	0.02	0.03	....	0.11

* A 5,000° F.

Material	LONGITUD DE ONDA Y TEMPERATURA PROMEDIO				
	9.3 100° F	5.4 500° F	3.6 1,000° F	2,500° F	0.6 Solar
Acero inoxidable					
18-8, pulido	0.15	0.18	0.22		
18-8, intemperizado	0.85	0.85	0.85		
Tubo de acero					
Oxidado .....	....	0.80			
Tungsteno en filamento	0.03	....	....	0.18	0.35 ⁺
Zinc					
Pulido	0.02	0.03	0.04	0.06	0.46
Placa galvanizada	0.25				
Materiales de construcción y aislantes					
Hojas de asbesto	0.93	0.93			
Asfalto	0.93	....	0.9	....	0.93
Ladrillo					
Rojo	0.93	....	....	....	0.7
Refractario	0.9	....	0.7	0.75	
De sílice	0.9	....	0.75	0.84	
Refractario de magnesita	0.9	....	....	0.4	
Esmalte, blanco	0.9				
Mármol, blanco	0.95	....	0.93	....	0.47
Papel, blanco	0.95	....	0.82	0.25	0.28
Yeso	0.91				
Techo de tejamanil	0.93				
Acero esmaltado, blanco .....	....	....	....	0.65	0.47
Asbesto-cemento, rojo .....	....	....	....	0.67	0.66
Pinturas:					
Laca aluminizada	0.65	0.65			
Pinturas lechosas	0.95	0.88	0.70	0.42	0.35
Laca, negra	0.96	0.98			
Pintura de negro de humo	0.96	0.97	....	0.97	0.97

+ A 6,000° F.

Material	LONGITUD DE ONDA Y TEMPERATURA PROMEDIO				
	9.3 100° F	5.4 500° F	3.6 1,000° F	1.8 2,500° F	0.6 Solar
Pintura roja	0.96	....	....	....	0.74
Pintura amarilla	0.95	....	0.5	....	0.30
Pinturas de aceite (todos colores)	0.94	0.9			
Oxido de zinc, blanco (ZnO)	0.95	....	0.91	....	0.18
Otros:					
Hielo	0.97 ‡				
Agua	0.96				
Carbón					
T-Carbón, 0.9% cenizas	0.82	0.80	0.79		
Filamento	0.72	....	....	0.53	
Madera	0.93				
Vidrio	0.90	....	....	....	(Bajo)

‡ A 32° F.

BIBLIOGRAFIA

TERMODINAMICA.

Virgil Moring Faires.

Editorial UTEHA.

1962.

PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

Frank Kreith.

Edit. Herrero Hnos.

1968.

MECANICA DE MATERIALES.

F. R. Shanley.

Edit. Mc Graw - Hil.

1965.

HORNOS INDUSTRIALES.

Trinks, W.

Edit. URNO.

Bilbao, España.

1971.

MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACION.

Paul de Garmo.

Edit. Reverté.

México.

1967.

